

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»**

Д.Р. Яхутль; Б.А. Басс; Р.А. Малеев; И.М. Шендеровский.

**ИСКРОВЫЕ СВЕЧИ ЗАЖИГАНИЯ.
Основы проектирования и производства**

Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники в качестве учебного пособия для студентов всех форм обучения по дисциплине «Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования» по специальности 140607 «Электрооборудование автомобилей и тракторов» направления подготовки 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», а также для аспирантов

Москва

2010

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000 г. для специальности 140607.65 «Электрооборудование автомобилей и тракторов».

Рецензенты: д.т.н., профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» Московского энергетического института В. Г. Еременко

к.т.н., доцент кафедры «Электротехника и компьютеризованные электромеханические системы» МГТУ «МАМИ» В.П. Коробченко

Искровые свечи зажигания. Основы проектирования и производства: учебное пособие/Д. Р. Яхутль, Б. А. Басс, Р. А. Малеев, И. М. Шендеровский.
—
М.: МГТУ «МАМИ», 2010. — 181 с.

В пособии, подготовленном на основании многолетнего опыта работы в области свечей зажигания научными сотрудниками Научно-исследовательского и экспериментального института автомобильной электроники и электрооборудования (ФГУП НИИАЭ) совместно с кафедрой «Электрооборудование автомобилей и тракторов» МГТУ «МАМИ», изложены основные сведения об искровых свечах зажигания, условиях их работы, о порядке и этапах разработки новых конструкций. Приведены методики расчета электрической прочности изолятора, теплового состояния свечи зажигания, лабораторных, стендовых моторных и дорожных испытаний. Даны сведения о применяемых материалах, технологии производства, о правилах эксплуатации свечей зажигания, основных неисправностях, методах их обнаружения и предупреждения.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов», а также для аспирантов.

Специальные термины и определения

Искровая свеча зажигания (свеча зажигания, свеча) – искровой разрядник, предназначенный для воспламенения рабочей смеси в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с принудительным зажиганием (далее - ДВС) при помощи искрового разряда, образованного в зазоре между изолированным (центральным) электродом и электродом массы (боковым электродом) свечи зажигания.

Рабочая часть свечи зажигания – поверхности деталей, расположенных непосредственно в камере сгорания ДВС: теплового конуса изолятора, части центрального электрода выступающей из изолятора, электрода массы (бокового электрода), а также поверхности металлического корпуса.

Контактная часть свечи зажигания – детали со стороны высоковольтного провода (высоковольтного наконечника) системы зажигания: резьбовая контактная головка и контактная гайка (при наличии) или штыревая контактная головка.

Цоколь свечи зажигания – часть металлического корпуса свечи с резьбой, предназначенная для монтажа свечи на ДВС и для связи электрической цепи высокого напряжения системы зажигания с массой двигателя (автомобиля).

Искровой зазор – промежуток между изолированным центральным электродом и электродом массы (боковым электродом).

Рабочая камера свечи зажигания - полость, образуемая внутренней поверхностью металлического корпуса свечи и наружной поверхностью теплового конуса изолятора, сообщающаяся с камерой сгорания двигателя.

Тепловой конус изолятора (юбка изолятора) – часть изолятора расположенная в рабочей камере свечи зажигания, воспринимающая своей поверхностью поток тепла от пламени в процессе сгорания, раскаленных отработавших газов при выпуске и охлаждаемая свежей рабочей смесью при впуске и сжатии.

Работоспособность свечи зажигания – бесперебойность искрообразования в искровом зазоре при условиях, предусмотренных нормативно-технической документацией.

Рабочая температура свечи зажигания – температура деталей свечи зажигания в процессе работы на ДВС.

Тепловая характеристика свечи зажигания - зависимость рабочей температуры свечи от параметров скоростного или нагрузочного режимов работы двигателя.

Верхний предел тепловой характеристики – величина равная рабочей температуре теплового конуса изолятора и (или) электродов свечи зажигания, при которой возникает калильное зажигание.

Нижний предел тепловой характеристики – величина равная температуре теплового конуса изолятора и (или) электродов свечи зажигания, при которой нагар с их поверхностей выгорает.

«Горячая» свеча зажигания (относительное понятие) – при прочих равных условиях на двигателе, имеющая рабочую температуру больше, чем «холодная» свеча зажигания.

«Холодная» свеча зажигания (относительное понятие) – при прочих равных условиях на двигателе, имеющая рабочую температуру меньше, чем «горячая» свеча зажигания.

Калильное число – условное число, позволяющее различать «горячие» и «холодные» свечи зажигания и характеризующее свойство свечи зажигания не вызывать калильного зажигания наиболее нагретыми поверхностями своей рабочей части при стандартных условиях. За калильное число, как правило, принимается условная величина, численно равная среднему индикаторному давлению в цилиндре ДВС испытательной установки, при котором появляется калильное зажигание.

Шкала калильных чисел (ряд калильных чисел) – условный числовой ряд принятый изготовителем для обозначения тепловых характеристик производимых свечей зажигания. Единой шкалы, общепринятой в каком-либо регио-

не и, тем более, в мире не существует в силу метрологической неопределенности определения и, соответственно, условности калильного числа. Исключение составляет Российская Федерация на территории которой для всех производителей установлен единый ряд калильных чисел включает в себя 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26 условных единиц, но допускается использование других рядов.

Нагар - образовавшиеся на поверхности рабочей части свечи зажигания (изоляторе, электродах и металлическом корпусе) твердые продукты неполного сгорания различного химического состава и физических свойств.

Шунтирование системы зажигания – короткое замыкание высоковольтной цепи системы зажигания на массу при утечке тока по нагару на поверхности теплового конуса изолятора и (или) по токопроводящему мостику в искровом зазоре.

Электропроводный мостик (токопроводящий мостик) – нагар частично или полностью заполняющий искровой зазор, обладающий проводимостью и создающий электрическую цепь, замыкающую изолированный центральный электрод на массу.

Искрообразование – возникновение искрового разряда в искровом зазоре свечи зажигания и его существование в период от пробоя до угасания.

Искровой разряд (искра электрическая, искра) - нестационарный электрический разряд в газе, возникающий в электрическом поле.

Зажигание – процесс образования первичного очага воспламенения под воздействием искрового разряда.

Первичный очаг воспламенения – зона воспламенения рабочей смеси непосредственно под воздействием искрового разряда в камере сгорания ДВС. От устойчивого первичного очага воспламенения в камере сгорания распространяется, как правило, вначале ламинарный, а затем турбулентный фронт пламени. Если первичный очаг воспламенения недостаточно устойчив, воспламенение по камере сгорания не распространяется.

Калильное зажигание – полностью или частично неуправляемое зажигание рабочей смеси в ДВС, вызванное источником зажигания (например, накалившимся клапаном) независимым от искры свечи зажигания.

Детонация – аномальный процесс сгорания, имеющий взрывной характер с резким местным повышением температуры и образованием ударной волны. Сопровождается звонким металлическим стуком, вызванным вибрацией деталей двигателя. Как правило, возникает в наиболее отдаленных от свечи зажигания областях камеры сгорания перед фронтом пламени в еще несгоревшей рабочей смеси, по мере роста ее температуры и давления.

Дизелинг – неравномерная неуправляемая работа бензинового, как правило, карбюраторного, ДВС при отключении зажигания на малой частоте вращения коленчатого вала, возникающая из-за самовоспламенения горючей смеси при сжатии, подобно тому, как это происходит в дизелях.

Оглавление

Введение	9
Глава 1. Условия работы свечи зажигания	14
1.1. Воздействия на свечу зажигания	14
1.2. Искровое зажигание и воспламенение.	18
1.3. Аномалии процесса сгорания.....	22
1.4. Качество топлива и моторного масла.	25
1.5. Нагарообразование и самоочищение	27
Глава 2. Классификация, устройство и основные характеристики	29
2.1. Классификация свечей зажигания	29
2.2. Устройство основных моделей	41
2.3. Тепловая характеристика и калильное число.....	49
2.4. Направление развития конструкций	53
Глава 3. Особенности электрофизических процессов в искровых свечах зажигания автомобильных ДВС.....	58
3.1. Основные электрические характеристики искрового разряда	58
3.2. Типы разряда между электродами свечи зажигания и их физические характеристики	61
3.3. Эффективность передачи энергии	70
3.4. Электрический разряд по поверхности диэлектрика (перекрытие) в свечах зажигания	72
Глава 4. Методика и алгоритмы численного моделирования теплового состояния свечи зажигания	78
4.1. Постановка задачи	78
4.2. Математическое моделирование рабочего цикла ДВС	85
4.3. Математическая модель температурного поля свечи.....	91
4.4. Алгоритм расчета тепловых характеристик свечи.....	96
Глава 5. Разработка свечей зажигания.....	100
5.1. Требования стандартов и Технического регламента	100
5.2. Основные этапы работ.....	110

5.3. Расчет электрической прочности изолятора	111
5.4. Расчет тепловых характеристик свечи зажигания	114
Глава 6. Испытания и контроль качества	120
6.1. Лабораторные испытания	120
6.2. Определение калильного числа.....	128
Глава 7. Производство свечей зажигания	137
7.1. Основные материалы для изготовления	137
7.2. Производство изоляторов и металлодеталей	143
5.3. Сборочное производство	146
5.4. Изготовление свечей–термопар	148
Глава 8. Эксплуатация свечей зажигания	151
8.1. Хранение и использование свечей зажигания.....	151
8.2. Определение причин отказов.	153
8.3. Снятие и установка свечи зажигания.....	155
8.3. Оценка состояния свечи зажигания и определение технического состояния ДВС по виду рабочей части свечи зажигания	158
8.4. Очистка свечи от нагара	159
8.5. Проверка работоспособности.....	160
Литература.....	162

Введение

Искровые свечи зажигания являются одним из компонентов систем зажигания двигателей внутреннего сгорания с принудительным зажиганием (далее – ДВС). Они предназначены для воспламенения рабочей смеси в цилиндрах ДВС при помощи искрового разряда, создаваемого системой зажигания в конце такта сжатия, при строго определенном положении поршня (в поршневых ДВС) или ротора (в роторно-поршневых ДВС). Искровой разряд, создаваемый системой зажигания, должен обладать энергией, необходимой для воспламенения горючей смеси на любом режиме работы двигателя во всех условиях эксплуатации. Конструкция свечи зажигания во многом определяет место размещения первичного очага воспламенения в камере сгорания и его параметры.

От совершенства конструкции и качества изготовления свечи зажигания существенно зависят пусковые характеристики, надежность, мощность, топливная экономичность, а также токсичность отработавших газов ДВС. С другой стороны, функциональные свойства свечей зажигания зависят от их соответствия ДВС по основным размерам, конструкции, тепловой характеристике и величине искрового зазора. При высоких значениях давления и температуры, возникающих в процессе работы, свечи должны надежно противостоять воздействию химически агрессивных продуктов сгорания. При этом изолятор должен выдерживать высокое электрическое напряжение. Решающее влияние на надежность и долговечность свечи зажигания оказывает техническое состояние ДВС, характер и условия эксплуатации, качество топлива и моторного масла.

Свечи зажигания различаются по применяемым при их изготовлении материалам, конструкции, размерам и тепловым характеристикам (калильным числам). Они могут быть неэкранированными, когда их контактная часть выступает из металлического корпуса, и экранированными у которых контактная часть расположена внутри металлического экрана.

Искровой разряд у большинства свечей образуется непосредственно в искровом зазоре между электродами. При «скользящей искре» разряд проис-

ходит по поверхности изолятора установленного между электродами. Существуют свечи с комбинированным разрядом, в которых одна часть искры образуется между электродами, а другая по поверхности изолятора.

В процессе работы из-за неполноты сгорания в пристеночной зоне на рабочих деталях свечи образуется нагар. В связи с возможностью шунтирования системы зажигания и отказа в искрообразовании, свечи должны самоочищаться, автоматически поддерживая необходимую рабочую температуру в температурных пределах, обеспечивающих удаление нагара и исключающих возможность калильного зажигания.

Свечи должны обеспечивать свою работоспособность в условиях, когда электрические, механические и химические нагрузки соперничают между собой по своей интенсивности. За весь срок службы они должны выдержать десятки миллионов рабочих циклов. Непрерывный рост удельных мощностей двигателей, при ужесточении норм токсичности отработавших газов,

В свою очередь работоспособность свечи зависит от соответствия двигателю по конструкции, основным размерам, величине искрового зазора и тепловой характеристике.

Одной из основных задач при разработке свечи зажигания является обеспечение условий, при которых температура центрального электрода и теплового конуса изолятора свечи зажигания находятся в пределах примерно от 350-400 °С (температура самоочищения от нагара) до 850-900 °С (температура, при которой возникает калильное зажигание) при любом скоростном и нагрузочном режимах работы ДВС, в том числе и форсированного наддувом. Длительная работа свечи зажигания имеющей температуру ниже той, при которой происходит самоочищение, приводит к шунтированию системы зажигания токопроводящим нагаром, отлагающимся на поверхности теплового конуса ее изолятора свечи зажигания и, как следствие, нарушению бесперебойности искрообразования. При превышении температуры свыше уровня, достаточного для калильного зажигания, в цилиндре ДВС возникает неуправляемое воспламенение горючей смеси перегретыми элементами, каковыми могут являться центральный

электрод или тепловой конус изолятора, а на очень «холодных» свечах зажигания – электрод массы, особенно если он имеет значительные размеры.

Решение этой задачи заключается в разработке конструктивных и технологических мероприятий, направленных на расширение диапазона работоспособности свечи зажигания, т.е. совокупности режимов работы ДВС, на которых обеспечено ее функционирование в необходимых температурных пределах. Для этого необходимо уметь экспериментально определять и (или) уметь рассчитывать величину температуры в различных частях свечи зажигания, особенно в критических зонах (торцевые части теплового конуса изолятора и центрального электрода).

Экспериментальное определение температур в определенных точках свечи зажигания требует встраивания миниатюрных термопар, что весьма непросто, учитывая условия работы этого изделия. Из-за небольших размеров установить в изолятор свечи зажигания более одной термопары практически невозможно. Кроме того, встраивание термопары приводит к существенному изменению конструкции свечи зажигания, что существенно влияет на температурное поле и снижает ценность полученных результатов.

Для этой цели предпочтительнее использовать методы математического моделирования температурного поля свечи зажигания, которые позволяют сократить объем экспериментальных исследований, а также сократить количество вариантов опытных образцов, подлежащих моторным стендовым и эксплуатационным испытаниям.

Работы по проектированию, организации производства, сертификации и контролю качества свечей зажигания в бывшем СССР осуществлял, а после его распада в Российской Федерации осуществляет Федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт автомобильной электроники и электрооборудования (ФГУП НИИАЭ). Основным документом при разработке и проведении испытаний является разработанный институтом ФГУП НИИАЭ ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые. Общие технические условия». В нем учтены требования международных стандартов в

области искровых свечей зажигания и прежде всего ISO 1919 «Транспорт дорожный. Свечи зажигания M14x1,25 с плоской опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндра»; ISO 8470 «Транспорт дорожный. Свечи зажигания M14x1,25 с плоской опорной поверхностью, шестигранником под ключ 16 мм и посадочное место в головке цилиндра»; ISO 11565 «Транспорт дорожный. Свечи зажигания M14x1,25. Технические требования и методы испытаний».

В последние десятилетия существования СССР, головным производителем искровых свечей зажигания в автомобильной промышленности был Энгельсский завод автотракторных запальных свечей (ЭЗАЗС), расположенный в г. Энгельсе, Саратовской обл. Он был единственным, специализированным на выпуске искровых свечей зажигания, работал по полному циклу основного производства и производил до 40% свечей зажигания. Кроме того, ЭЗАЗС изготавливал до 90% изоляторов свечей зажигания из керамик с наименованиями «Уралит», «Боркорунд», «Хилумин» и поставлял их для сборки свечей зажигания на Тюменском (ТАТЭ) и Куйбышевском (КЗАТЭ) заводах автотракторного электрооборудования, не имевших собственного керамического производства.

Кроме того, искровые свечи зажигания по полному производственному циклу, включая изготовление изоляторов, осуществляло и осуществляет Уфимское агрегатное производственное объединение им. 50-летия СССР (УАПО) авиационной промышленности.

В связи с перестройкой, производство свечей зажигания в конце прошлого века прекратил заводы КЗАТЭ и ТАТЭ. В этот же период некоторые конверсионные предприятия освоили производство комплектующих деталей свечей зажигания, в том числе изоляторов, и на основе кооперации с ними, а также на основе поставок деталей из-за рубежа, сборочные производства были организованы ООО «ГРАН-Лтд» (г. Энгельс, Саратовской обл.), ООО «Элис-ЭЗ» (г. Саратов), и некоторыми другими предприятиями. Производство металлических деталей и сборку свечей зажигания освоило ГУП ПО «Ульяновский машиностроительный завод» (ГУП ПО «УМЗ»). Изготовление биметаллических цен-

тральных электродов было налажено СКБ РОТОР (г. Тула). Донской завод радиодеталей, Новосибирский электровакуумный завод, ОНПП «Технология» (г. Обнинск) и другие производители керамики освоили производство свечных изоляторов.



Рис.В.1. Неэкранированная свеча зажигания типа А17ДВ-10 для автомобилей ВАЗ:
1 – производства ОАО ЭАЗС; **2** – производства УЗЭТИ ФГУП «УАПО»; **3** – производства ГУП ПО УМЗ **4** – производства ООО «ГРАН Лтд»; **5** – производства ОНПП «Технология»; **6** – производства ОАО «Европейская автомобильная электроника»; **7** – производства ООО «ЭЛИС-ЭЗ».

Фирма «Brisk» (Чехия) организовала сборочное производство в г. Озеры (Калининградская область), а ОАО «Европейская автомобильная электроника» производство свечей по технологии фирмы «Еуцет» (Франция) в г. Ярославле. На 2010 год достаточно массовое производство искровых свечей зажигания осуществляют ЭАЗС, преобразованный вначале в ОАО с иностранными инвестициями «Завод автотракторных запальных свечей» (ОАО «ЗАЗС»), а затем в ОАО «Роберт Бош Саратов» и УАПО им 50-летия СССР, преобразованное в ФГУП «УАПО».



Рис. В.2. Экранированные влагозащищенные свечи зажигания, производившиеся в СССР для нужд вооруженных сил:

- 1** – неэкранированная свеча А17ДВ-10 (приводится для сравнения);
- 2** – экранированная влагозащищенная свеча зажигания СН307;
- 3** – свеча зажигания СН302Б;
- 4** – свеча зажигания СН302А.

В составе объединения ФГУП «УАПО» свечи зажигания, в том числе для автомобильных ДВС производит Уфимский завод электротехнических изделий (УЗЭТИ ФГУП «УАПО»). Образцы их продукции представлены на рисунках В.1 и В.2.

Глава 1. Условия работы свечи зажигания

1.1. Воздействия на свечу зажигания

Главной задачей всей конструкции свечи является создание зазора, через который периодически пропускается мощный электрический заряд под напряжением 20-30 тысяч вольт, создающий плазменный жгут, который поджигает рабочую смесь. Самые небольшие отклонения параметров приводят к неустойчивой работе, особенно заметной на холостых оборотах, а иногда и к полной остановке или невозможности завести двигатель. Основной причиной таких отклонений являются накопления продуктов сгорания бензина, забивающие искрообразующий зазор.

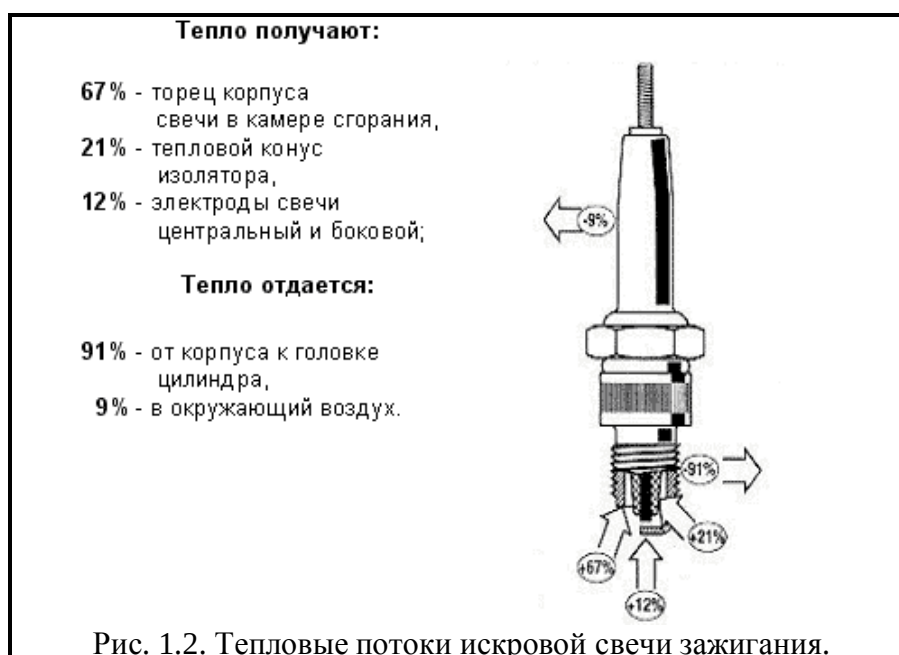


Рис. 1.1. Схематический чертеж свечи зажигания.

При работе на ДВС свеча зажигания подвергается воздействию химически агрессивных веществ в условиях давлений и температур, возникающих в камере сгорания. При этом изолятор свечи должен выдерживать высоковольтное напряжение, создаваемое системой зажигания. Электрические, тепловые, механические, химические нагрузки на свечи зажигания в процессе работы ДВС носят переменный характер и воздействуют с частотой, пропорциональной частоте вращения коленчатого вала. Эти воздействия повторяются за весь срок службы свечи зажигания миллионы и десятки миллионов раз.

Современные автомобильные ДВС, в большинстве случаев работают по четырехтактному рабочему циклу и только малолитражные двигатели различного назначения работают по двухтактному циклу. В связи с этим нагрузка на свечу при работе на двухтактном ДВС практически вдвое больше, чем на четырехтактном. Учитывая, что двухтактные ДВС чаще всего имеют воздушное охлаждение, менее эффективное, чем жидкостное, срок службы свечей зажигания оказывается еще меньше. Если на современных четырехтактных автомобильных ДВС с рабочим объемом более 1,5 л. ресурс свечей зажигания находится в пределах примерно от 40 до 80 тыс. км. пробега автомобиля, то на двухтактных мотоциклетных двигателях эта величина не превышает 15 тыс. км.

Тепловые нагрузки. Свечу зажигания устанавливают в головке блока цилиндров так, что ее рабочая часть находится в камере сгорания, а контактная - в подкапотном пространстве автомобиля. Температура газов в камере сгорания изменяется от достаточно низкого значения на впуске до примерно двух тысяч градусов при сгорании. Температура воздушной среды под капотом автомобиля в определенных климатических условиях может достигать величины 150 С и даже выше. Из-за неравномерности нагрева температура в различных частях свечи зажигания может отличаться на сотни градусов, что приводит к тепловым напряжениям и деформациям.



Это усугубляется тем, что изолятор и металлические детали значительно отличаются по величине коэффициента термического расширения. Кроме этого, свечи зажигания могут подвергаться термическим ударам, так как при движении автомобиля или мотоцикла и тем более при мойке не исключена возможность попадания воды на ее наиболее уязвимую часть – керамический изолятор. Общепринятая схема тепловых потоков в свече зажигания приведена на рис. 1.2.

Механические нагрузки. Давление в цилиндре ДВС может изменяться от величины вдвое меньше атмосферного давления при впуске, до нескольких десятков бар ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$) при сгорании. При этом свечи зажигания подвергаются значительным вибрационным и ударным нагрузкам.

Химические нагрузки. При сгорании топлива имеющего различные присадки образуется целый «букет» химически активных веществ, способных вызвать окисление даже весьма стойких материалов, тем более что рабочая часть изолятора и электродов свечи зажигания на режимах работы ДВС, близких к режиму максимальной мощности или максимального крутящего момента, может иметь рабочую температуру до 900°C .

Электрические нагрузки на изолятор при воздушном разряде. При искрообразовании, длительность которого может составлять до 3 миллисекунд, изолятор свечи зажигания оказывается под воздействием импульса высокого напряжения создаваемого системой зажигания. Максимальное значение высоковольтного импульса равно пробивному напряжению искрового зазора свечи, которое в свою очередь зависит от давления и температуры в камере сгорания и величины искрового зазора. В некоторых случаях напряжение, воздействующее на изолятор свечи зажигания может достигать 20-25 кВ (амплитудное значение). Некоторые систем зажигания могут создавать напряжение значительно выше, но его ограничивает пробивное напряжение искрового зазора или напряжение поверхностного перекрытия изолятора.

Электрические нагрузки на изолятор при поверхностном и комбинированном искровом разряде. Искровой разряд у большинства конструкций све-

чей зажигания образуется непосредственно в воздушном искровом зазоре между электродами. При «скользящей искре» разряд происходит по поверхности изолятора установленного между электродами. Существуют свечи с комбинированным разрядом, в которых одна часть искры образуется между электродами, а другая по поверхности изолятора. У «полупроводниковых» и эрозийных свечей зажигания искровой разряд возникает вдоль поверхности специальной керамики или поверхности изолятора, с напыленным на нее металлом (например, серебром). Под воздействием искрового разряда поверхность изолятора подвергается эрозии и ее свойства изменяются, в результате возникает утечка тока по поверхности изолятора и процесс искрообразования нарушается. Также повреждается рабочая (разрядная) поверхность у «полупроводниковых» и эрозийных свечей зажигания, вследствие чего ресурс у таких свечей оказывается меньше, чем при воздушном искровом зазоре, что ограничивает их применение на ДВС транспортных средств (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Автомобильная «полупроводниковая» свеча зажигания поверхностного разряда.
1 – свеча зажигания А17ДВ-10 с воздушным искровым зазором, приведена для сравнения;
2 – экспериментальная автомобильная полупроводниковая свеча зажигания поверхностного разряда разработанная в НИИАП. Видны признаки отказа в работе в виде нагара, образовавшегося через 3 тыс. км пробега автомобиля.

Воздействие искрового разряда на электроды. В дуговой фазе разряда (см. ниже) протекание сильного тока приводит к появлению горячих катодных пятен на электроде. Электрическая дуга не может существовать без электронов,

излучаемых горячими катодными пятнами. Температура пятен достигает 3000 К, что выше температуры плавления даже самого тугоплавкого металла. Это приводит к неизбежному микроскопическому испарению материала электрода с каждой новой искрой. Скорость электрической эрозии при прочих равных пропорциональна энергии искрового разряда и температуре электрода.

Нагарообразование. В процессе работы из-за неполноты сгорания в пристеночной зоне на рабочих деталях свечи зажигания образуется нагар. В связи с возможностью шунтирования системы зажигания и вследствие этого отказа в искрообразовании, свечи должны самоочищаться, автоматически поддерживая необходимую рабочую температуру в температурных пределах, обеспечивающих удаление нагара и исключающих возможность возникновения калильного зажигания.

1.2. Искровое зажигание и воспламенение.

Искровой разряд, создаваемый высоковольтным импульсом вырабатываемым системой зажигания, должен обладать энергией, необходимой для воспламенения рабочей смеси на любом режиме работы ДВС во всех условиях эксплуатации.

1-я фаза искрового разряда. Газы и их смеси являются идеальными изоляторами, но при приложении к электродам свечи зажигания достаточно высокого напряжения происходит пробой газа и в искровом зазоре образуется ионизированный канал, проводящий электрический ток. Явление пробоя газа высоким напряжением обусловлено тем, что случайные электроны, вызванные проникающим ионизирующим космическим излучением, под воздействием электромагнитного поля, получают ускорение в сторону положительного электрода. При столкновении с молекулами газа происходит цепная реакция ионизации, газ становится проводником и образуется проводящий канал. Это явление называется пробоем, первой фазой существования искры. После пробоя электрическое сопротивление канала стремится к нулю, сила тока увеличивается до сотен ампер, а напряжение уменьшается. Первоначально процесс протекает в очень узкой зоне, но вследствие быстрого нарастания температуры, канал рас-

ширится со сверхзвуковой скоростью. При этом образуется ударная волна, воспринимаемая на слух как характерный треск, создаваемый искрой.

2-я фаза искрового разряда. Протекание сильного тока приводит к появлению электрической дуги, при этом температура в канале разряда при определенных условиях может достигнуть величины до 6000 К. Скорость расширения проводящего канала стабилизируется, а затем уменьшается до величины, примерно соответствующей нормальной скорости распространения пламени в данных условиях.

3-я фаза искрового разряда. При силе тока ниже 100 мА, возникает тлеющий разряд, и температура уменьшается до 3000 К. По мере убывания энергии, запасенной во вторичной цепи системы зажигания, искровой разряд угасает. Разряд в искровом зазоре свечи зажигания характеризуется относительно малыми значениями энергии и продолжительностью, в связи с чем, температура канала разряда, как правило, находится в пределах 2000-2800°K.

Тлеющий разряд более продолжителен, чем дуговой и плазма разряда может перемещаться относительно электродов свечи с потоком смеси газов в цилиндре, возникающим вследствие движения поршня. Эффективная длина искры возрастает, а напряжение разряда увеличивается. Если напряжение оказывается недостаточным для поддержания искры, появляется вероятность ее угасания и повторного возникновения. Из-за остаточной ионизации в искровом зазоре повторная искра возникает при значительно меньшем напряжении, она по целому ряду причин менее эффективна для воспламенения.

Образование первичного очага воспламенения. При искровом зажигании на самых ранних этапах невозможно разделить процессы образования искрового разряда и воспламенения. Уже при пробое искрового зазора, даже если воспламенение и распространение пламени по каким-либо причинам не произошло, в экспериментальной камере сгорания обнаруживаются продукты химических реакций горения. Суммарная энергия первичного очага воспламенения определяется как энергия искрового разряда плюс энергия химических реакций горения. Если скорость расширения плазмы разряда превышает скорость рас-

пространения пламени, большее значение имеет энергия искры. Когда скорость расширения канала искрового разряда уменьшается, все большее значение приобретает энергия химических реакций вплоть до развития устойчивого фронта пламени.

Образование устойчивого фронта пламени. В результате искрового зажигания образуется первичный очаг воспламенения, затем формируется фронт пламени, который быстро распространяется по всему объему камеры сгорания. Сгорание горючей смеси происходит в достаточно узком фронте пламени, который перемещается по камере сгорания подобно степному пожару. Перемещение носит турбулентный характер, характеризуется скоростью порядка десятков метров в секунду и сопровождается относительно плавным нарастанием температуры и давления в цилиндре ДВС. Несгоревшее топливо догорает уже за фронтом пламени, в пристеночных зонах, в зазорах между поршнем и цилиндром.

Гасящее влияние электродов свечи зажигания является существенным фактором, влияющим на процесс образования и динамику развития первичного очага воспламенения в камере сгорания ДВС. Отрицательное воздействие тем выше, чем больше размеры электродов, что ограничивает возможность повышения ресурса свечей зажигания простым увеличением размеров. Кроме того, чем массивнее электроды, тем больше пробивное напряжение и меньше резерв на износ электродов до предельно допустимой величины зазора. На рис. 1.2 представлена эволюция свечей зажигания для промышленных газовых двигателей и газомотокомпрессоров. Для увеличения долговечности их электроды выполнялись все более массивными, но в результате оказалось, при увеличении диаметра центрального электрода свыше 5 мм рост долговечности свечей зажигания практически прекращается. Такой же результат оказывается при увеличении количества электродов массы свыше 4-х (рис. 1.4, поз 3). Гасящее влияние электродов ограничивает применение «форкамерных» свечей зажигания по указанным выше причинам, а также наряду с рядом других факторов, таких как плохая вентиляция полостей малого объема, особенно при дросселировании

входного отверстия, потери при перетекании заряда из основной камеры сгорания и обратно, и связанные с увеличением поверхности камеры сгорания.



Рис. 1.4. Свечи зажигания повышенной долговечности с особо массивными электродами:

- 1 - свеча зажигания А17ДВ-10 (для сравнения);
- 2 – свеча зажигания с 4-х лепестковым боковым электродом оптимальных размеров;
- 3, 4, 5 – свечи зажигания с возрастающими размерами электродов с целью увеличения их долговечности при работе на промышленных газовых двигателях.



Рис 1.5. Свечи зажигания, имеющие от 4-х до 6-и особо массивных боковых электродов:

- 1 - свеча зажигания, имеющая 4 электрода массы диаметром 2 мм каждый, установленные в отверстиях, выполненных перпендикулярно оси свечи;
- 2 – свеча зажигания с 4-х лепестковым боковым электродом;
- 3 – свеча зажигания с 6-и лепестковым боковым электродом;
- 4 – свеча зажигания с 4-х лепестковым боковым электродом оптимальных размеров.

1.3. Аномалии процесса сгорания

При некоторых условиях нормальный процесс сгорания может нарушаться, что отражается на надежности и сроке службы свечи. К таким нарушениям можно отнести следующее.

Пропуски воспламенения. Такие нарушения нормального процесса могут возникнуть из-за выхода состава горючей смеси за пределы горючести из-за чрезмерного переобеднения или переобогащения топливом, пропусков искрообразования или при недостаточной энергии искры. При этом нарушается работа ДВС, могут возникнуть различные повреждения свечи зажигания, в том числе ускоряется процесс образования нагара на изоляторе и электродах (см. ниже «Определение состояния двигателя по внешнему виду свечей зажигания»).

Калильное зажигание. Различают преждевременное калильное зажигание, в случае его возникновения до образования искры, сопутствующее калильное зажигание, возникающее одновременно с образованием искры и запаздывающее калильное зажигание – после образования искры. Калильное зажигание может быть вызвано перегретыми участками поверхностей выпускного клапана, поршня, цилиндра или свечи зажигания. Кроме того, преждевременное воспламенение может быть вызвано тлеющими частицами нагара.

Преждевременное калильное зажигание определяется тем, что при его возникновении самопроизвольно увеличивается угол опережения зажигания, обеспечиваемый системой зажигания. Это приводит к росту скорости нарастания давления и температуры, увеличивается их максимальное значение, детали ДВС перегреваются и угол опережения зажигания еще больше увеличивается. Процесс принимает ускоряющийся характер до момента, когда угол опережения зажигания станет таким, что мощность ДВС начнет стремительно падать.

Последствия калильного зажигания. При калильном зажигании вероятны повреждения выпускного клапана, поршня, поршневых колец, поверхности цилиндра и прокладки головки цилиндров (рис. 1.4). У свечи могут полностью или частично сгореть электроды, а некоторых случаях может оплавиться даже

изолятор (см. ниже «Определение состояния двигателя по внешнему виду свечи зажигания»).

Детонация. Это явление возникает при недостаточной детонационной стойкости топлива, в наиболее удаленном от свечи месте у горячих поверхностей, в результате сжатия еще не сгоревшей горючей смеси основным фронтом пламени. Детонация распространяется со скоростью 1500-2500 м/с, что превышает скорость звука для газовой среды при давлении в конце сжатия. Ударные волны многократно отражаются от стенок и вызывают вибрацию и локальный перегрев цилиндра, поршня, клапанов и свечи. Возможны повреждения, как при калильном зажигании, так как перегретые детали становятся неспособными выдерживать возросшую нагрузку. На изоляторе свечи могут образоваться сколы и трещины, электроды могут оплавиться и даже полностью выгореть. Характерным признаком детонации являются металлические стуки, вибрация и потеря мощности двигателя, увеличение расхода топлива и иногда появление черного дыма из выхлопной трубы.



Рис. 1.6. Характерные повреждения поршней в случае калильного зажигания и (или) детонации в цилиндре ДВС.

Признаки детонации. Особенностью детонации является некоторая задержка по времени от момента возникновения необходимых условий до ее возникновения. Она связана с тем, что для образования активных веществ, способствующих возникновению взрывного процесса необходимо определенное время. В связи с этим детонация наиболее вероятна при относительно небольших

оборотах коленчатого вала и полной нагрузке. Наиболее вероятен выход на этот режим при движении автомобиля на подъеме при полностью нажатой педали газа. Если при этом мощность двигателя оказывается недостаточной, скорость автомобиля и частота вращения коленчатого вала уменьшаются. При недостаточном в данных условиях октановом числе топлива возникает детонация, сопровождаемая звонким металлическим стуком.

Дизелинг. В некоторых случаях возникает крайне неравномерная неуправляемая работа бензинового ДВС при очень малой частоте вращения коленчатого вала при отключенном зажигании. Это явление возникает из-за самовоспламенения горючей смеси при сжатии, подобно тому, как это происходит в дизелях. В русской технической литературе «дизелинг» является сравнительно новым термином, взятым с английского «dieseling».

В карбюраторных ДВС, где не исключена возможность подачи топлива в цилиндр при выключенном зажигании, дизелинг, как правило, может возникать при попытке остановить двигатель. При выключении зажигания двигатель продолжает работать с очень малыми оборотами и крайне неравномерно. Это может продолжаться в течение нескольких секунд, иногда дольше, затем двигатель самопроизвольно останавливается. Чаще всего это явление связывают с калильным зажиганием от перегретой свечи, но это неверно.

Причина возникновения дизелинга – в особенностях конструкции камеры сгорания и, особенно, в качестве топлива, низкой его стойкости к самовоспламенению при сжатии из-за особенностей химического состава. Экспериментально доказано, что свечи зажигания не могут являться причиной калильного зажигания на режимах работы ДВС, при которых возникает дизелинг, так как их температура при малых оборотах недостаточна для воспламенения горючей смеси. Калильное зажигание возникает при температуре электродов и изолятора 850-900 С, а такой величины она может достигнуть только при работе двигателя с максимальной мощностью. Теплоемкость свечи зажигания столь мала, что температура ее деталей резко падает с уменьшением частоты вращения коленчатого вала ДВС. Это связано и с тем, что рабочие части свечи зажигания

при отключенном зажигании практически мгновенно охлаждаются свежей рабочей смесью, поступающей в цилиндр, а если топливо не поступает - дизелинг невозможен. Свеча зажигания не причина дизелинга, а вероятная жертва, так как из-за неполноты сгорания топливовоздушной смеси, неизбежной в этих условиях, усиливается процесс образования нагара на изоляторе и электродах.

1.4. Качество топлива и моторного масла.

Автомобильные бензины. Для обеспечения нормальной работы свечей зажигания автомобильные бензины должны иметь достаточную детонационную стойкость, минимальное коррозионное воздействие и не иметь склонности к образованию отложений.

Промышленное производство бензина включает первичную и вторичную переработку нефти с последующим смешением различных компонентов для получения необходимых свойств. При первичной переработке нефти (прямой перегонке) получают 10-25% бензина невысокого качества с октановым числом 40-50. При вторичной переработке нефти на крупных нефтеперерабатывающих заводах ее подвергают сложной технологической обработке с целью расщепления крупных молекул на мелкие, стабилизации химического состава и удаления вредных примесей, особенно серы. Выход бензина увеличивается до 60%. Затем, путем смешения продуктов первичной и вторичной переработки нефти с добавлением различных присадок получают товарные бензины. Автомобильные бензины одной марки, производимые на разных предприятиях, в связи с разницей в технологии, имеют несколько различные составы.

Детонационная стойкость. Это свойство бензина зависит от его химического состава и структуры углеводородов, полученных при переработке нефти. Способность сопротивляться появлению детонации зависит от молекулярной массы - чем она выше, тем ниже стойкость топлива к детонации и наоборот. Стойкость бензина к детонации, так называемое октановое число, определяется в лабораторных условиях на специальной моторной установке, путем сравнения стойкости испытуемого бензина и изооктана в смеси с гептаном. Октано-

вое число изооктана принимают равным 100. Добавка гептана, нестойкого к детонации, снижает октановое число.

Антидетонационные присадки и выносители. Для повышения октанового числа в бензин добавляют антидетонаторы - химические соединения, подавляющие детонацию. Для удаления из камеры сгорания продуктов сгорания при применении антидетонационных присадок в топливо добавляют т.н. «выносители» – химические вещества, способствующие удалению продуктов сгорания. Тем не менее, условия работы свечи при использовании антидетонаторов существенно ухудшаются.

В 60 годы XX века, в условиях обычной эксплуатации было проведено крупномасштабное исследование влияния на работу свечей зажигания антидетонатора на основе марганца. Выяснилось, что при использовании этого антидетонатора надежность и долговечность свечи падает настолько, что марганцевый антидетонатор пришлось забраковать. Полностью удалить продукты сгорания не удастся и на электродах и тепловом конусе изолятора свечи образуется нагар. Под воздействием температуры эти отложения могут стать электропроводящими и вызвать частичный или полный отказ в искрообразовании.

Небольшие фирмы получают высокооктановые бензины АИ-95 и АИ-98 путем добавки в бензины АИ-92 и АИ-95 до 12-15 % метил-трет-бутилового эфира, при этом бензин имеет необходимое качество. Достаточно широко используются различные железосодержащие антидетонаторы и традиционный антидетонатор на основе тетраэтила свинца – этанол (в этом случае добавляют краситель, так как этанол ядовит).

К сожалению, недобросовестные производители изготавливают суррогатный бензин из низкооктановых бензинов, добавляя антидетонационные присадки свыше всяких действующих норм, что приводит к отказам свечей зажигания в искрообразовании из-за появления отложений на изоляторе и электродах. Сверхнормативное, (более 37 мг Fe/л) использование содержащих железосодержащих антидетонаторов, например ФерРоз, ФК-4 или АПК вызывает отложение токопроводящего нагара красного цвета на свечах. Этот нагар прак-

тически невозможно удалить, он приводит к полному и необратимому их отказу.

Коррозионное воздействие топлива. Окислительные свойства бензина определяются содержанием кислот, щелочей и сернистых соединений. Сильным коррозионным воздействием на металлы обладают минеральные кислоты и щелочи, их наличие в бензинах недопустимо. Сернистые соединения обладают высокой коррозионной активностью и способствуют образованию нагара, однако полностью избавиться от них непросто, особенно при переработке сернистой нефти.

Моторные масла также имеют нефтяное происхождение и содержат присадки – противостоящие износу, стабилизирующие, антикоррозионные, моющие и т.д. При сгорании масла, попавшего в камеру сгорания, образуются зольные остатки которые, как и продукты неполного сгорания топлива, могут образовывать нагар на свечах.

1.5. Нагарообразование и самоочищение

Нагар на свече зажигания - это в основном твердая углеродистая масса с шероховатой поверхностью, образующаяся при температуре поверхности 200 С и выше. Свойства, внешний вид и цвет нагара зависят от условий его образования, состава топлива и моторного масла. В некоторых случаях, особенно на двухтактных двигателях, нагар может образовать в искровом зазоре электропроводный мостик и вызвать короткое замыкание во вторичной цепи системы зажигания. И в том, и в другом случае происходит частичное или полное прекращение искрообразования. Если свечу удастся очистить от нагара, то ее работоспособность восстанавливается. В связи с этим одно из важнейших требований к свече зажигания - способность самоочищаться от нагара. Во многом степень совершенства ее конструкции определяется именно этим свойством.

Условия самоочищения свечи зажигания. Удаление нагара, если в продуктах сгорания нет несгораемых веществ, происходит при температуре 350-400 С - нижний температурный предел работоспособности свечи. Эффективность самоочищения от нагара зависит от того, как быстро тепловой конус изо-

лятора нагреется до этой температуры после пуска двигателя. С этой точки зрения, длину теплового конуса изолятора необходимо выполнять как можно большей, а сам тепловой конус целесообразно выдвигать в камеру сгорания. То же самое требуется для предотвращения утечек тока и соответственно для снижения потерь энергии зажигания.

Глава 2. Классификация, устройство и основные характеристики

2.1. Классификация свечей зажигания

Принято считать, что свеча зажигания практически в ее современном виде – с керамическим изолятором и электродами из жаростойкой нержавеющей стали была изобретена в 1902 году сотрудником фирмы «Bosch» (Германия) Готлибом Хонольдом. Но бытовая керамика, используемая для производства изоляторов свечей зажигания, в то время оказалась слишком непрочной. В качестве альтернативы использовались изоляторы из стекла, кварца, слюды, талька и даже резины. Вплоть до Второй мировой войны наиболее подходящим материалом в качестве изолятора считалась слюда – природный материал с приемлемыми механическими и диэлектрическими свойствами. Но у слюды был недостаток – при перегреве она теряла влагу, и в результате изолятор разрушался. Окончательный отказ от применения слюды был связан с появлением этилированных бензинов содержащих тетраэтилсвинца в качестве антидетонатора. При работе двигателя на этилированном бензине слюда, из которой изготавливался изолятор свечи зажигания, подвергалась эрозии с катастрофической быстротой.

Проблема была решена с появлением новой технической керамики на основе диоксида алюминия (Al_2O_3), химически инертной к этилированному топливу и обладающей всеми необходимыми свойствами – электрической, термической и механической прочностью.

Изолированный (центральный) электрод свечей зажигания, условия работы которого еще сложнее (только изоляторы со скользящей искрой подвергаются непосредственному воздействию искрового разряда), вначале изготавливался из различных нержавеющей сталей, затем из особо жаростойких никелевых и хромоникелевых сплавов. Так как эти сплавы имеют недостаточную теплопроводность, электроды стали делать биметаллическими – внутри медный сердечник, снаружи - оболочка из жаростойкого сплава. Для специальных дви-

гателей применялись электроды из благородных материалов и их сплавов – серебра, золота, платины, иридия, иттрия, палладия и даже сплава иридия и радия.

В связи с высокой стоимостью этих материалов, в целях экономии, их стали применять в виде небольших насадок (напаяек) на рабочую поверхность электродов из жаростойких сплавов, а в последнее время – на биметаллические электроды. Электрод массы, до широкого использования технологии сварки встык с корпусом, изготавливали из нержавеющей сталей, а после перехода на сварку стали применять никель – марганцевые сплавы, например НМц-5. Некоторые производители и боковые электроды делают биметаллическими и снабжают их, как и центральные электроды, насадками из благородных металлов.

В связи с существенным влиянием свечей зажигания на надежность и функциональные показатели работы ДВС, а также многообразием их конструкций, работа по созданию искровых свечей зажигания, начатая в середине XIX века не прекращается. Ежегодно патентуются тысячи изобретений в этой области во всех промышленно развитых странах мира, особенно в США, Японии, Европейских странах и осваивается производство сотен новых конструкций и модификаций.

Классификация всех разработанных тысячами изобретателей конструкций, в том числе самых экзотических, защищенных десятками тысяч патентов, чрезвычайно сложна. Тем не менее, основные варианты свечей зажигания, производимые в различное время промышленностью различных стран, в том числе в России, и некоторые экспериментальные образцы, не нашедшие пока широкого применения, поддаются упрощенной классификации представленной ниже, что позволяет в первом приближении разобраться в многообразии их конструкций.

По материалу изолятора свечи зажигания различаются на свечи с изолятором из слюды (рис. 2.1), с изолятором из стеатита (и те и другие в настоящее время не производятся и представляют интерес только с исторической точки зрения), и с изолятором из различных технических керамик, в основном на основе ди-

оксида алюминия - Al_2O_3 (рис. 2.2). ОСТ 37.003.036 «Изоляторы керамические для искровых свечей зажигания» делит изоляторы на две группы, в зависимости от содержания в них Al_2O_3 . Группа I – изоляторы с содержанием Al_2O_3 свыше 90%, изоляторы группы II – менее 90%. Изоляторы группы II не соответствуют современным требованиям и в настоящее время не используются для производства свечей зажигания.



Рис. 2.1. Свечи зажигания производства фирмы «Bosch» (Германия, 30-е гг. XX в.) с изолятором из слюды, и современная свеча зажигания А17ДВ-10 (крайняя слева) с изолятором из керамики группы I по ОСТ 37.003.036.



Рис. 2.2. Свечи зажигания с изоляторами из керамики группы I и II по ОСТ 37.003.036.

Крайняя слева – свеча зажигания А17ДВ-10 с изолятором из керамики группы I по ОСТ 37.003.036, вторая слева – свеча зажигания А16У, третья слева – М12У с цинковым антикоррозийным покрытием корпуса производства завода КАТЭК; крайняя справа – свеча зажигания М12У с защитно-декоративным ок-

сидным покрытием корпуса производства завода ТАТЭ. Свечи зажигания с обозначением «У» в маркировке были снабжены изоляторами из керамического материала под наименованием «Уралит» разработанного на основе природных материалов и производимого до конца XX века. В 60-х годах XX века свечи зажигания этих типов герметизировались по соединению изолятора с корпусом тальком, а по соединению изолятора с центральным электродом – термостойким цементом («термоцементом»).

По защите от радиопомех и попаданию влаги различаются неэкранированные свечи зажигания (открытого исполнения), и экранированные влагозащищенные (герметизированные) свечи зажигания, у которых изолятор полностью закрыт металлическим экраном, являющегося неотъемлемой частью конструкции свечи зажигания (рис. 2.3). При этом контакт с высоковольтным проводом расположен внутри изолятора и защищен от попадания влаги экраном и манжетой, изготовленной из маслобензостойкой резины, стойкой к воздействию температур окружающей среды в диапазоне от минус 40÷55 °С до плюс 150÷180 °С.

По способу сборки различают свечи зажигания разборной и неразборной конструкции (рис. 2.4). В настоящее время неразборные неэкранированные свечи зажигания не производятся. Частично разборную конструкцию имеют экранированные влагозащищенные свечи зажигания типа СН307В; СН307Н для армейских автомобилей (см. рис. 2.2 и 2.20).



Рис. 2.3. Экранированные влагозащищенные свечи зажигания разборной конструкции производства Московского Опытного завода НИИАвтоприборов (ОЗНИИАП).

На рис. 2.3 использованы следующие обозначения:

- 1 – неэкранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения;
- 2 – экранированная влагозащищенная свеча зажигания для эскортных мотоциклов;
- 3 – свеча зажигания Э785 для легковых автомобилей;
- 4 – сердечник (изолятор в сборе с электродом и контактом с использованием стеклогерметика), показан в частичном разрезе.

На рис. 2.4 приведены:

- Неразборная свеча зажигания А17ДВ-10 (крайняя слева).
- Разборная свеча зажигания М19/20 производства завода КАТЭК (вторая слева).
- Разборные свечи зажигания производства фирмы KLG (Англия) – 50 годы XX века.



Рис. 2.4. Варианты конструкций свечей зажигания.

По наличию встроенного резистора различают свечи зажигания без встроенного помехоподавительного резистора (сопротивления) и со встроенным резистором. Встроенный резистор устанавливается в канале изолятора и может быть выполнен в виде отдельного узла или детали (рис. 2.5).

По типу искрового зазора различают свечи зажигания:

- с воздушным искровым зазором;

- со скользящей по поверхности изолятора искрой (рис. 2.6, поз.1);
- комбинированные, где часть пути искра проходит по воздуху, а часть - по поверхности изолятора (рис. 2.7, поз. 2,3,4);
- эрозийные, в которых на поверхность изолятора по которой проходит искра напыляют металл, например серебро (рис 2.8);
- полупроводниковые, в которых поверхность, по которой проходит искра, выполнена из полупроводникового материала (см. рис 2.8).

В современных свечах зажигания чаще всего используют специальный стеклогерметик со свойствами резистора. При этом таблетка стеклогерметика кроме детали, соединяющей изолятор с центральным электродом и удерживающей электрод и контактную головку в канале изолятора, выполняет функцию встроенного помехоподавительного резистора.



Рис. 2.5. Экранированная неразборная свеча зажигания со встроенным помехоподавительным резистором:

- 1 – незэкранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения;
- 2 – экранированная неразборная свеча зажигания в частичном разрезе, виден центральный электрод, над ним таблетка стеклогерметика и внутренний контакт, над которым имеется место для установки резистора (на данном изображении отсутствует);
- 3 – сердечник (изолятор в сборе) экранированной неразборной свечи зажигания в частичном разрезе, виден центральный электрод, над ним таблетка стеклогерметика и внутренний контакт, над которым установлен помехоподавительный резистор.

По конструкции электрода массы различают свечи зажигания:

- с боковым электродом, механически закрепленным в отверстии корпуса, выполненным в стенке цоколя перпендикулярно оси свечи (рис. 2.9, поз. 3, 4);
- с боковым электродом, приваренным к торцу корпуса и выполненным из проволоки круглого или близкого к прямоугольному сечению Г-образной формы («крючкообразных») электродов может быть от одного до четырех (рис. 2.10); при этом искровой зазор может быть образован между изолированным электродом и электродом массы со стороны торца или боковой цилиндрической поверхности центрального электрода (рис. 2.1, поз. а, б);
- с кольцевым электродом массы, своей цилиндрической поверхностью окружающий центральный электрод, в некоторых случаях снабженным отверстиями различной формы в своей боковой цилиндрической и (или) конической поверхности (рис. 2.11) кольцевым электродом массы, своей цилиндрической поверхностью окружающий центральный электрод.



Примечание. Свечи зажигания с кольцевым электродом массы, своей цилиндрической и (или) конической, а иногда сферической поверхностью окружающим центральный электрод и образующим своей внутренней поверхностью полость (камеру небольших размеров), внутри или на входе в которую расположен искровой зазор, в некоторых случаях называют форкамерными.



Рис. 2.8. Эрозийные и полупроводниковые свечи зажигания.
 1 – эрозийная автомобильная свеча зажигания разработки НИИАвтоприборов (ФГУП НИИАЭ);
 2 – эрозийная авиационная свеча зажигания;
 3, 4 – полупроводниковые свечи зажигания для авиационных и ракетных двигателей.



Рис. 2.9. Свечи зажигания с электродом массы круглого или прямоугольного сечения:
 1 – стандартный Г – образный электрод;
 2 – Г-образный электрод, образующий искровой зазор вместе с цилиндрической боковой поверхностью центрального электрода;
 3 – цилиндрический электрод массы свечи зажигания спортивного мотоцикла, заделанный в отверстие, выполненное в стенке корпуса;
 4 – то же с двумя электродами массы.



Рис. 2.10 Свечи зажигания с боковым электродом (электродами) Г-образной формы.

На рис. 2.10 показаны следующие конструкции свечей зажигания:

1 – с одним электродом массы; 2 – с двумя электродами массы; 3 – с тремя электродами массы; 4 – с двумя электродами массы, концы которых соединены диском с зубцами, образующими вместе с центральным электродом 6 искровых зазоров; 5 – с тремя электродами массы, концы которых соединены, образуя вместе с центральным электродом искровой зазор увеличенной со стороны электрода массы площадью (для снижения гасящего влияния электродов в электроде массы напротив центрального электрода в некоторых конструкциях выполняют от одного до трех отверстий).



Рис. 2.11. «Форкамерные» свечи зажигания:

1 – свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения;

2, 3 – с кольцевым электродом массы, своей внутренней цилиндрической поверхностью окружающий изолированный (центральный) электрод и имеющим три отверстия в своей боковой конической поверхности;

4 – с кольцевым электродом массы, снабженным прямым или Г-образным выступом, выполненного из проволоки близкого к прямоугольному сечению, торцовая поверхность которого образует совместно с поверхностью центрального электрода искровой зазор;

5 – с кольцевым электродом массы, своей цилиндрической поверхностью окружающий изолированный (центральный) электрод

По назначению различают свечи зажигания для автомобильных много-топливных двигателей (рис. 2.12), свечи зажигания для промышленных газовых двигателей и газомотокомпрессоров (рис. 2.13), специальные и комбинированные со свечами накаливания для розжига автомобильных предпусковых подогревателей ДВС и отопителей кабин (рис. 2.14).



Рис. 2.12. Свечи зажигания для автомобильных многотопливных двигателей:

1 - неэкранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения;
2, 3 - экспериментальные свечи зажигания Э820, Э745 разработанные и изготовленные в НИИАЭ для многотопливных двигателей НАМИ.



Рис. 2.13. Свечи зажигания для промышленных газовых двигателей и газомотокомпрессоров (ГМК):

1 - неэкранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения; 2 - экранированная влагозащищенная свеча зажигания для ГМК. 3, 4 – неэкранированные свечи зажигания для промышленных газовых двигателей и ГМК.



Рис. 2.14. Свечи зажигания для розжига автомобильных предпусковых подогревателей ДВС и автономных отопителей кабин и кузовов автомобилей:

- 1 - незранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения;
 - 2 – свеча зажигания для предпускового подогревателя ПЖД-44 автомобилей КАМАЗ;
 - 3 – комбинированная свеча искровая и накаливания;
 - 4 – свеча зажигания для подогревателей и отопителей.
- Две последние - производства фирмы «Веги» (Германия).

Малогоабаритные свечи зажигания для автомобильных ДВС, мототехники, двигателей средств малой механизации и мотоинструментов могут быть с плоской (рис. 2.15) и конической опорной поверхностью (рис. 2.16).



Рис. 2.15. Малогабаритные свечи зажигания с плоской опорной поверхностью и резьбой на корпусе М10х1 для специальных автомобильных ДВС и мототехники

- 1 – незранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения;
- 2 – свеча зажигания для двигателя автомобиля ЗИС-110;
- 3 – свеча зажигания фирмы «Magnetty Mareilly» (Италия).

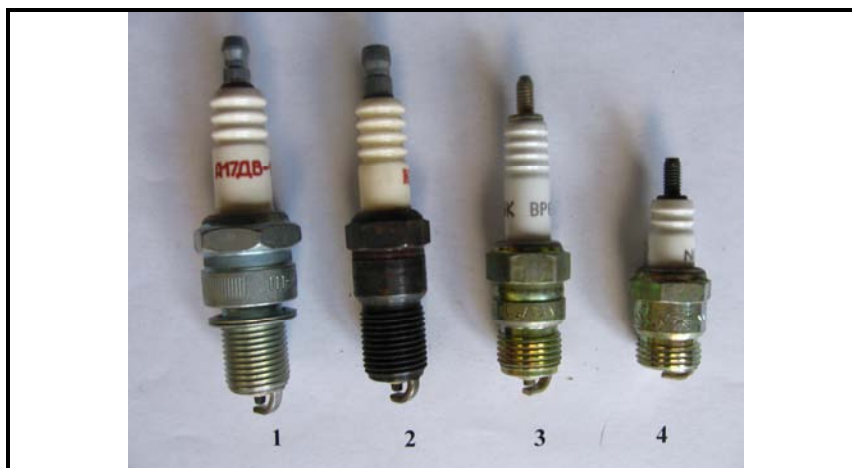


Рис. 2.16. Малогабаритные свечи зажигания с конической опорной поверхностью для мототехники, двигателей средств малой механизации и мотоинструментов.
1 - неэкранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения; 2 – свеча зажигания АК17ДВ; 3,4 - свечи зажигания фирмы NGK (Япония).

Свечи зажигания, применяемые при проведении экспериментальных работ по доводке ДВС могут быть с прозрачной вставкой в изоляторе для наблюдения за процессом горения, со встроенными датчиками температуры, давления, детонации, с изменяемой величиной искрового зазора непосредственно на работающем двигателе, с двумя изолированными электродами и т.д. (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Свечи зажигания, применяемые при проведении экспериментальных работ:

- 1 – с прозрачной вставкой в изоляторе;
- 2 – свеча зажигания со встроенной термопарой;
- 3 – свеча зажигания с регулируемым (изменяемым при работе ДВС) зазором;
- 4 – свеча зажигания с двумя изолированными электродами.

2.2. Устройство основных моделей

При всем разнообразии конструкций, современная неэкранированная искровая свеча зажигания включает в себя керамический изолятор, металлический корпус, электроды и контактную головку с контактной гайкой для соединения с наконечником высоковольтного провода (рис. 1.1, рис. 2.18, рис. 2.19). Конструкция экранированной свечи зажигания отличается наличием защитного металлического экрана и размещением контакта с высоковольтным проводом в цилиндрической полости изолятора, защищенной от проникновения влаги резиновым уплотнением (рис. 2.20). В «классической» европейской конструкции свечи зажигания:

- изолятор изготавливают из корундовой керамики с содержанием Al_2O_3 не менее 95%;
- корпус изготавливают методом объемной штамповки из прутка малоуглеродистой стали круглого сечения;
- центральный электрод делают биметаллическим из меди с жаростойкой оболочкой из сплава Ni-Cr-Fe; его закрепляют в изоляторе с использованием обычного или резистивного стеклогерметика.
- электрод массы выполняют из сплава Ni-Mn из плющенной проволоки и приваривают методом контактной сварки к корпусу;
- уплотнительное кольцо выполняют гофрированным – трехслойным, из мягкой стали;
- контактную головку, штампуют из стальной проволоки с резьбовой частью под гайку;
- контактную гайку делают из цветных металлов (Al; Zn) или из латуни; при установке на резьбовую контактную головку ее нередко зачеканивают.

Керамический изолятор. Для обеспечения бесперебойности искрообразования изолятор должен обладать необходимой электрической прочностью даже при высокой рабочей температуре. Напряжение, прикладываемое к изолятору в процессе работы двигателя, равно напряжению пробоя искрового зазора. Это

напряжение возрастает с увеличением давления и величины зазора и уменьшается по мере возрастания температуры. На двигателях с классической системой зажигания используются свечи с искровым зазором 0,5-0,7 мм. Максимальная величина пробивного напряжения в этих условиях не превышает 12-15 кВ (амплитудное значение). На двигателях с электронными системами зажигания установочная величина искрового зазора составляет величину 0,8-1,0 мм. В процессе эксплуатации она может увеличиться до 1,5 мм. При этом пробивное напряжение может достигать величины 20-25 кВ.



Рис. 2.18. Устройство незранированной свечи зажигания.

- 1 – свеча зажигания А17ДВ-10 в сборе;
- 2 – корпус в сборе, под ним кольцо уплотнительное;
- 3 – керамический двухступенчатый изолятор, под ним шайба уплотнительная (теплоотводящая), над ним гайка контактная типа «А»;
- 4 – электрод изолированный (центральный), над ним – таблетка стеклогерметика, над таблеткой – контактная головка;
- 5 – одноступенчатый изолятор в сборе с центральным электродом и контактной головкой (сердечник) свечи зажигания типа А11, под ним теплоотводящая (уплотнительная) шайба.

Конструкция изолятора относительно проста - это цилиндр с осевым отверстием для установки центрального электрода.

В средней части изолятора имеется утолщение, так называемый «поясок» для соединения с корпусом. Ниже пояска расположена более тонкая цилиндрическая часть «дульце», переходящая в тепловой конус. В месте перехода

от дульца к тепловому конусу расположена коническая поверхность, предназначенная для установки между изолятором и корпусом герметизирующей теплоотводящей шайбы. Выше пояска расположена «головка», а в месте перехода от пояска к головке расположено плечико под завальцовку буртика корпуса при сборке свечи.



Рис. 2.19. Устройство незранированных свечей зажигания (показаны в разрезе):

- 1 – свеча зажигания A17ДВ-10 в сборе;
- 2 – свеча фирмы NGK (Япония) с одноступенчатым изолятором (корпус показан в частичном разрезе);
- 3 – свеча фирмы Magnety Marelli (Италия) с двухступенчатым изолятором и монометаллическим центральным электродом (корпус и сердечник показаны в частичном разрезе);
- 4 – свеча фирмы NGK (Япония) с двухступенчатым изолятором и биметаллическим центральным электродом (корпус и сердечник показаны в частичном разрезе, тепловой конус на рисунке отсутствует).



Рис. 2.20. Устройство экранированной влагозащитенной свечи зажигания СН307Н частично разборной конструкции.

1 - незэкранированная свеча зажигания А17ДВ-10, приведена для сравнения; 2 - экранированная влагозащитенная свеча зажигания СН307Н; 3, снизу – встроенный помехоподавительный резистор в сборе с керамическим изолятором резистора; 3, сверху – контактное устройство КУ-20А для соединения с высоковольтным проводом (над ним видна резиновая манжета и часть накидной гайки экранированного шланга для соединения с резьбой на экране свечи зажигания); 4, снизу – изолирующая керамическая втулка; 4, сверху – резиновая уплотнительная манжета.

Допустимая, с учетом коэффициента запаса, толщина стенок определяется электрической прочностью материала изолятора. По отечественным стандартам, изолятор должен выдерживать испытательное напряжение от 18 до 22 кВ (действующее значение), что больше амплитудного в 1,4 раза. Длина головки изолятора определяется напряжением поверхностного перекрытия и выполняется в пределах от 15 мм до 35 мм. У большинства автомобильных свечей эта величина около 25мм. Дальнейшее увеличение малоэффективно и приводит к снижению механической прочности изолятора. Для исключения возможности электрического пробоя по поверхности изолятора, его головку снабжают кольцевыми канавками (барьерами тока) и покрывают специальной глазурью для защиты от возможного загрязнения.

Функцию защиты от поверхностного перекрытия со стороны камеры сгорания выполняет тепловой конус. Эта важнейшая часть изолятора, при относительно небольших размерах, выдерживает без перекрытия по поверхности указанное выше напряжение.

Первоначально для свечей, в качестве материала изолятора, применялся обычный фарфор, но такой изолятор плохо сопротивлялся тепловому воздействию и имел низкую механическую прочность. С увеличением мощности двигателей потребовались изоляторы более надежные, чем фарфоровые. Продолжительное время применяли слюдяные изоляторы. Однако при использовании топлив с присадкой свинца слюда разрушалась. Изоляторы снова стали изготавливать керамическими, но не из фарфора, а из особо прочной технической керамики.

Современные изоляторы изготавливают из высокоглиноземистой конструкционной керамики на основе оксида алюминия методом изостатического прессования. Такая керамика, содержащая около 95% окиси алюминия, способна выдержать температуру до 1600°C и имеет высокую электрическую и механическую прочность. Важнейшим преимуществом керамики из оксида алюминия является то, что она обладает высокой теплопроводностью. Это существенно улучшает тепловую характеристику свечи, так как через изолятор проходит основной поток тепла, поступающий в свечу через тепловой конус и центральный электрод (Рис. 10).

Сердечник (изолятор в сборе с центральным электродом и контактной головкой).

Канал изолятора выполнен с переменным диаметром, его часть с меньшим размером предназначена для установки цилиндрической части центрального электрода. У свечей зажигания с резьбой на корпусе М14×1,25 и двухступенчатым изолятором эта часть канала может иметь диаметр 2,6 – 2,8 мм, а у свечей с двухступенчатым изолятором – диаметр 2,6 – 3,1 мм. Часть канала с большим диаметром выполняется немного конической для облегчения съема шпинделя при обточке сырой заготовки изолятора (до обжига). Ее диаметр в

нижней части (в месте установки головки центрального электрода) может находиться в пределах 4,3 – 4,5 мм, а в верхней части – 4,5 – 4,7 мм. Головка электрода опирается на коническую поверхность канала изолятора в месте перехода от большего диаметра к меньшему. Рабочая часть центрального электрода выступает на величину от 1,0 до 5,0 мм за торец теплового конуса изолятора. Закрепление электрода в канале изолятора и герметизацию этого соединения осуществляют с использованием стеклогерметика. Он представляет собой смесь специального технического стекла и порошка металла. Стекло должно иметь КТР соответствующий этому коэффициенту α керамики из которой изготовлен изолятор. В этом случае герметизирующая пробка не разрушится при изменениях температуры в процессе эксплуатации. Порошок металла (медь или свинец) добавляют в стекло для придания ему электрической проводимости. На рис. 2.21 показаны сердечники свечей зажигания в разрезе.

Металлический корпус. Корпус предназначен для установки свечи в двигатель и обеспечивает герметичность соединения с изолятором. К его торцу приваривается боковой электрод, а в конструкциях с кольцевым искровым зазором корпус непосредственно выполняет функцию электрода массы.

Изготавливают корпус штамповкой или точением из конструкционных малоуглеродистых сталей.

Внутри корпуса имеется кольцевой выступ с конической поверхностью, на которую опирается изолятор. На цилиндрической части корпуса выполнена кольцевая проточка, так называемая термоосадочная канавка. В процессе сборки свечи верхний буртик корпуса завальцовывают на поясok изолятора. Затем его нагревают и осаживают на прессе, при этом термоосадочная канавка подвергается пластической деформации и корпус плотно охватывает изолятор. В результате термоосадки корпус оказывается в напряженном состоянии, что обеспечивает герметичность свечи на весь срок службы.



Рис. 2.21. Сердечник (изолятор в сборе с центральным электродом и контактной головкой) в разрезе.

1 – сердечник свечи зажигания без встроенного резистора; 2 – сердечник свечи зажигания со встроенным резистором, совмещенным с таблеткой стеклогерметика высотой 7 мм.; 3 – сердечник свечи зажигания с единым внутренним стержнем, в виде соединенных между собой центрального электрода из жаростойкого сплава, медного сердечника и контактной головки, закрепленного в канале изолятора с помощью специального термостойкого герметика (термоцемента); 4 – сердечник свечи зажигания с биметаллическим центральным электродом у которого медный сердечник защищен кожухом из жаростойкого сплава.

Изолированный (центральный) электрод. Для снижения гасящего влияния и улучшения эффективности воспламенения, электроды свечи зажигания должны быть как можно более тонкими и длинными, а искровой зазор должен иметь максимально допустимую величину. С другой стороны, для обеспечения долговечности, электроды должны быть достаточно массивными.

В связи с этим, в зависимости от требований к мощности, топливной экономичности и токсичности двигателей с одной стороны, и требований к долговечности свечи с другой стороны, к каждому типу двигателя разрабатывалась своя конструкция электродов.

Появление биметаллических электродов позволило в определенной степени решить эту проблему, так как такой электрод имеет достаточную теплопроводность. В отличие от обычного «монометаллического» он при работе на двигателе имеет меньшую температуру и соответственно больший ресурс. В тех случаях, когда требуется увеличить ресурс, применяют два электрода массы (Рис.11). На свечах зарубежного производства с этой целью применяют три и

даже четыре электрода. Отечественная промышленность выпускает свечи с таким количеством электродов только для авиационных и промышленных газовых двигателей. Следует отметить, что с увеличением числа электродов снижается стойкость к образованию нагара и затрудняется очистка от нагара.

К материалу электродов предъявляются следующие требования: высокая коррозионная и эрозионная стойкость; жаростойкость и окислительная стойкость; высокая теплопроводность; достаточная для штамповки пластичность. Стоимость материала не должна быть высокой. Наибольшее распространение в отечественной промышленности для изготовления центральных электродов свечей зажигания получили жаростойкие сплавы: железо-хром-титан, никель-хром-железо и никель-хром с различными легирующими добавками.

Электрод массы должен обладать высокой жаростойкостью и стойкостью к коррозии. Он должен обладать хорошей свариваемостью с обычной конструкционной сталью, из которой изготавливают корпус, поэтому применяют сплав никель - марганец (например, НМц-5). Кроме того, боковой электрод должен обладать хорошей пластичностью для обеспечения возможности регулирования искрового зазора.

С целью снижения гасящего влияния электродов при доработке свечей на электродах выполняют канавки, в электроде массы проделывают сквозные отверстия. Иногда боковой электрод разделяют на две части, превращая одноэлектродную свечу в двухэлектродную. Некоторые зарубежные фирмы производят такие свечи серийно.

Встроенный резистор. Искровой разряд является источником электромагнитных помех, в том числе радиоприему. Для их подавления между центральным электродом и контактной головкой устанавливают резистор, имеющий при температуре 25 ± 10 С величину электрического сопротивления от 4 до 13 кОм. В процессе эксплуатации допускается изменение величины этого сопротивления в диапазоне 2 - 50 кОм после воздействия температуры от -40 до +300 С и импульсов высокого напряжения.

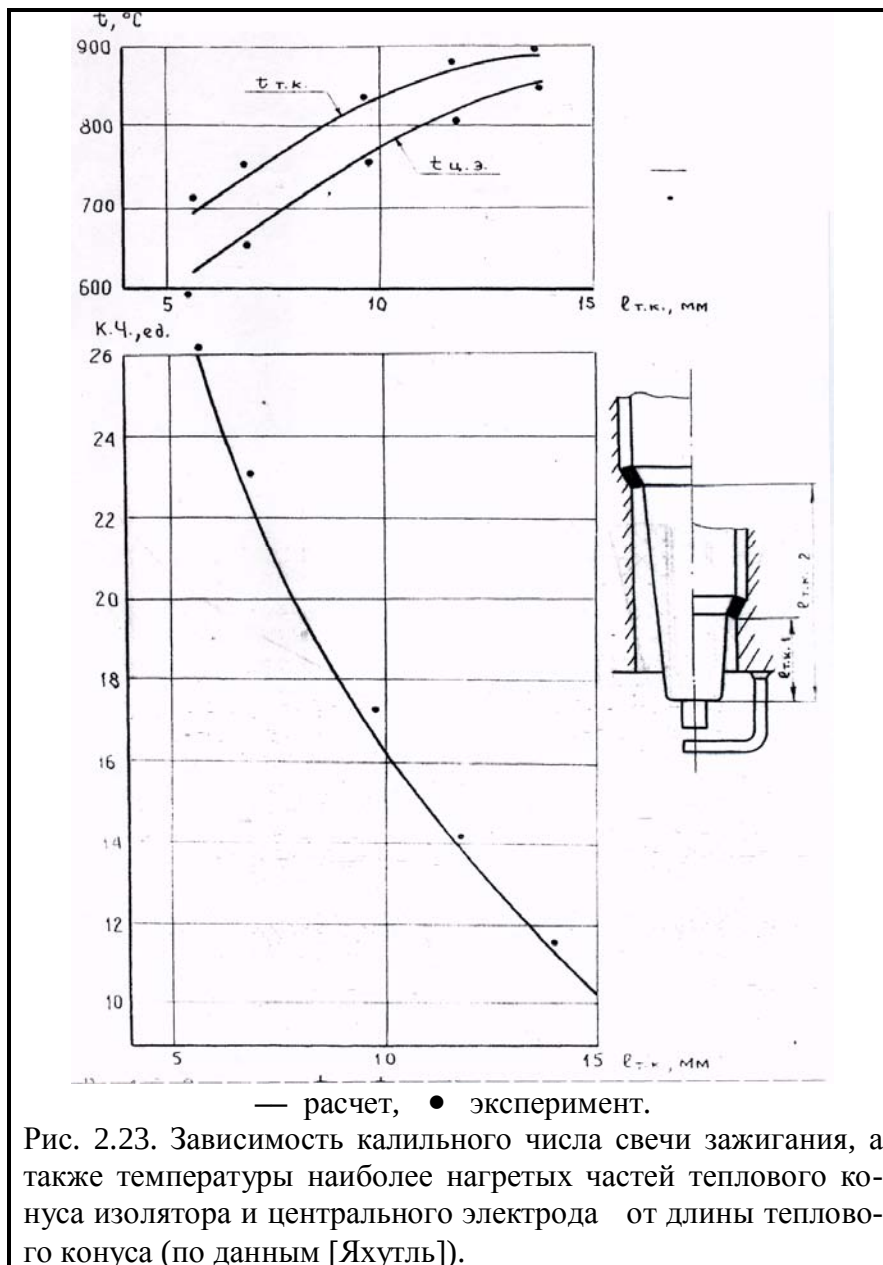
2.3. Тепловая характеристика и калильное число

Тепловая характеристика свечи зажигания это зависимость температуры теплового конуса изолятора или центрального электрода от режима работы двигателя. Различие в тепловых характеристиках свечей достигают в основном за счет изменения длины теплового конуса изолятора.

Основным фактором, влияющим на тепловую характеристику свечи зажигания и, соответственно, на величину калильного числа, является длина теплового конуса изолятора. Чем короче тепловой конус изолятора и меньше площадь поверхности изолятора, воспринимающего тепло, поступающее из камеры сгорания, тем свеча «холоднее», чем длиннее тепловой конус, тем свеча «горячее» (рис.2.22). Зависимость калильного числа свечи зажигания, а также температуры наиболее нагретых частей теплового конуса изолятора и центрального электрода от длины теплового конуса изолятора представлена на рис. 2.23. Слишком «холодная» для данного ДВС



свеча зажигания быстро покроется нагаром и искрообразование прекратится. Слишком «горячая» свеча зажигания может стать причиной калильного зажигания. Правильно подобранная к двигателю свеча зажигания при работе уже на минимальных скоростных и нагрузочных режимах работы ДВС способна самоочищаться от нагара, не вызывая калильного зажигания на режимах полной нагрузки или максимального крутящего момента.



Прямое определение тепловой характеристики связано с необходимостью измерения температуры теплового конуса изолятора и электродов на работающем двигателе. Это сложная техническая проблема, так как требует установки в свечу миниатюрных термодпар и защиту их от высокого напряжения. Такая работа требует огромных затрат и проводится только в исследовательских целях при доводке вновь разрабатываемых двигателей.

В связи с этим определение тепловой характеристики заменяют подбором свечей по верхнему температурному пределу. Для этого производятся тепловые ряды конструктивно одинаковых свечей с различными тепловыми характеристиками, отличающиеся только длиной теплового конуса изолятора и, со-

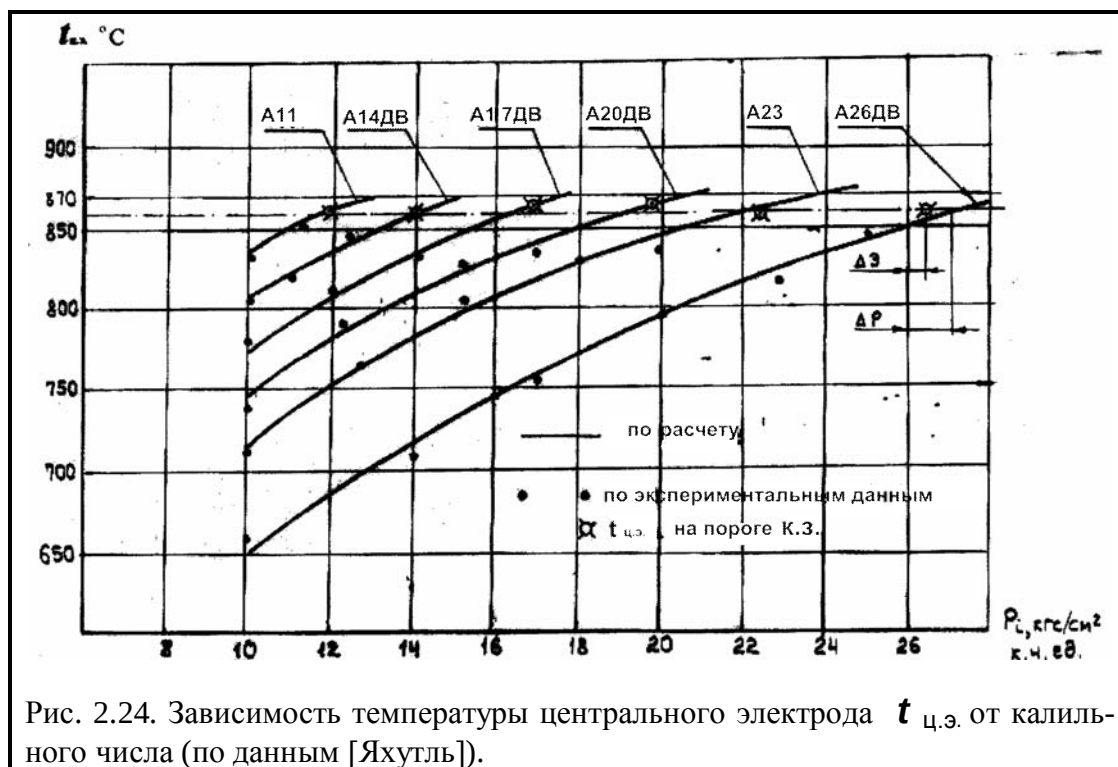
ответственно, объемом рабочей камеры. Каждую свечу теплового ряда испытывают на моторной испытательной установке, позволяющей за счет наддува моделировать тепловую напряженность двигателя с любой удельной мощностью, вплоть до самого форсированного спортивного. В процессе испытания величину наддува последовательно увеличивают, соответственно возрастает тепловая напряженность и основной характеризующий ее показатель - величина среднего индикаторного давления.

Величина среднего индикаторного давления, когда в цилиндре двигателя при испытании свечи возникает калильное зажигание, считается ее калильным числом.

Основным конструктивным параметром, с помощью которого изменяют величину калильного числа, является длина теплового конуса изолятора. Чем длиннее тепловой конус изолятора, тем рабочая температура свечи больше и наоборот, чем короче тепловой конус изолятора, тем температура меньше.

До 1974 г. свечи, производимые в СССР, имели в своей маркировке обозначение длины теплового конуса изолятора, выраженной в миллиметрах. Ветераны автомобилисты помнят свечи с уралитовыми изоляторами для автомобиля «Запорожец» первых выпусков, которые имели маркировку А6УС или А7,5УС, свечи для автомобиля «Волга» ГАЗ-21 с маркировкой А14У, свечи А11У для автомобиля «Москвич-401» и многие другие. Интересно отметить, что на первые модели автомобилей Волжского автозавода ставились свечи с изолятором из керамики «боркорунд», также с маркировкой длины теплового конуса изолятора, сначала А6БС, затем А7,5БС. С появлением двигателей автомобилей ВАЗ-2101, ГАЗ-24, АЗЛК-412, ЗАЗ-966, ЗИЛ-130, ГАЗ-53 и других возросли требования к свечам. Выяснилось, что необходимо учитывать то, что рабочая температура свечи зависит не только от длины теплового конуса изолятора, но и от многих других конструктивных и технологических факторов. Калильное число является интегральным показателем, характеризующим рабочую температуру свечи не только от длины теплового конуса, но и от других конструктивных факторов.

Каждой длине теплового конуса изолятора соответствует своя величина калильного числа. В соответствии с российским стандартом калильные числа следует выбирать из ряда 8, 11, 14, 17, 20, 23 и 26 условных единиц. Допускаются промежуточные значения, выраженные целыми числами.



С помощью калильных чисел различают более «горячие» и более «холодные» свечи. Эти понятия определены тем, что при установке на один и тот же двигатель «горячие» свечи в равных условиях имеют рабочую температуру выше, чем «холодные». Устанавливая последовательно на двигатель свечи с различными калильными числами, можно осуществить подбор по тепловой характеристике. Критерием подбора является отсутствие калильного зажигания при полной нагрузке двигателя. Вторым критерием является то, что ближайшая более «горячая» свеча калильное зажигание вызывает. Правильно подобранная свеча всегда должна иметь максимальную температуру, несколько ниже, чем температура калильного зажигания. При подборе свечи к двигателю угол опережения зажигания θ устанавливают на 10-15 градусов раньше относительно установочного. Этим способом искусственно повышают рабочую температуру свечи, что обеспечивает гарантированный запас до верхнего температурного предела.

Зарубежные фирмы имеют свои шкалы калильных чисел, прямые и обратные. В прямых шкалах с увеличением длины теплового конуса калильное число возрастает, а в обратных уменьшается. Отечественная шкала калильных чисел едина для всех производителей в России и является обратной. Чем больше калильное число, тем короче при прочих равных тепловой конус, тем свеча "холоднее". В отличие от нашей страны, за рубежом каждая фирма применяет свою шкалу калильных чисел и свою систему маркировки свечей. Для определения соответствия по калильному числу свечей различных производителей приходится пользоваться таблицами взаимозаменяемости (см. приложение 2).

2.4. Направление развития конструкций

При разработке свечей зажигания конструкторам требуется обеспечить:

- Наилучшие условия охлаждения при работе;
- бесперебойность искрообразования;
- оптимальную форму и расположение искрового зазора в камере сгорания ДВС;
- снижение гасящего влияния электродов;
- максимально возможную стойкость электродов;
- обеспечение оптимальных тепловых свойств;
- стойкость к нагарообразованию;
- снижение уровня радиопомех.

Непрерывный рост удельных мощностей ДВС, при ужесточении норм токсичности отработавших газов требуют улучшения рабочих характеристик свечей зажигания.

Размеры свечей зажигания имеют тенденцию к уменьшению. На автомобильных ДВС существует необходимость уменьшения диаметральных размеров свечи зажигания для экономии пространства при конструировании головки цилиндров. При этом увеличивается длина резьбовой части корпуса, что позволяет ближе подвести рубашку охлаждения ДВС к посадочному месту свечи и улучшить ее охлаждение. С этой целью размер шестигранника под ключ

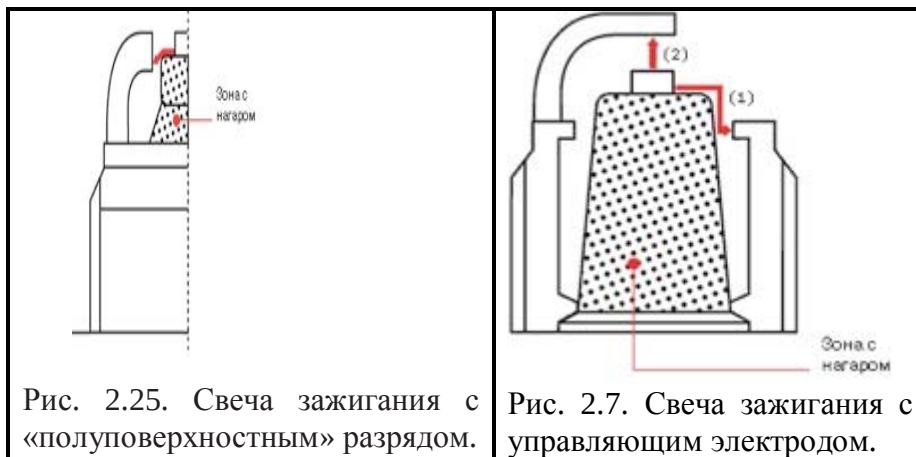
уменьшают с 20,8 до 16,0 мм, длину резьбовой части корпуса увеличивают с 12,7 до 19,0, а в последнее время – даже до 26,5 мм. Максимальная экономия пространства и наилучшее охлаждение свечи зажигания достигается при использовании конического посадочного места.

Для мотопил, мотокосилок и других инструментов, где важно снизить массу изделия, применяются малогабаритные свечи зажигания, у которой уменьшены диаметр изолятора и размер шестигранника. Масса малогабаритной свечи меньше, чем обычной почти в два раза. Их размеры постоянно уменьшаются по мере роста качества комплектующих деталей, применяемых в производстве материалов, совершенствования технологии.

Электроды свечей зажигания выполняют с оптимальным для конкретного двигателя выступанием в камеру сгорания для улучшения процесса искрообразования и воспламенения, диаметр электродов в рабочей части, создающей искровой зазор уменьшают, а для компенсации возможного снижения ресурса – выполняют из благородных материалов и сплавов (см. раздел «Классификация свечей зажигания»).

Надёжное искрообразование гарантируется при обеспечении хорошего доступа горючей смеси в искровой промежуток. Это также достигается при уменьшении диаметра центрального электрода (например, тонкий платиновый электрод). Максимальная надёжность искрообразования и воспламенения обеспечивается при установке двух свечей зажигания в один цилиндр ДВС, что ограничивается возможностями их размещения, тем более в относительно малолитражных ДВС. С этой точки зрения целесообразна разработка свечей зажигания с двумя изолированными и, по крайней мере, с двумя электродами массы, электрически независимыми друг от друга. Проблема заключается в сложности размещения двух электродов в одном изоляторе – из-за крайне ограниченных габаритов трудно обеспечить достаточную толщину стенок изолятора и, соответственно необходимую механическую и электрическую прочность (рис. 2.17, поз. 4).

Улучшения воспламенения рабочей смеси при существенно уменьшенном напряжении зажигания удастся добиться при использовании свечи со скользящим по поверхности изолятора разряда. При поверхностном разряде величина пробивного напряжения мало зависит от давления. Это позволяет увеличить длину разрядной поверхности при относительно небольшой величине разрядного напряжения.



Принцип работы свечей зажигания с «полуповерхностным» разрядом основан на том, что искра зажигания частично образуется в воздушном зазоре, а частично скользит по поверхности теплового конуса изолятора, удаляя при этом нагар.

Только тогда возникает искровой пробой от юбки изолятора на боковые электроды и происходит надежное воспламенение топливной смеси.

Другая конструкция свечи зажигания с использованием искрового разряда для качества дополнительной очистки свечи от нагара – свечи с основным и «управляющим» электродом. При наличии нагара такая свеча работает как при «полуповерхностном» разряде. Искра проходит через воздушный искровой зазор между «управляющим» электродом и изолятором, и далее – по поверхности изолятора, если он покрыт нагаром, с целью очищения. При отсутствии нагара, такая свеча зажигания работает как обычная двухэлектродная.

Тепловые свойства свечи зажигания, характеризующиеся тепловым диапазоном работоспособности можно улучшить с использованием следующих основных методов.

1. Сборку свечей осуществляют с минимально возможными зазорами между деталями. Полностью устранить зазоры не удастся из-за различия коэффициентов термического расширения изолятора и металлических деталей.

2. Центральный электрод изготавливают биметаллическим, из меди с оболочкой из жаростойких сплавов, при этом толщину стенок оболочки стремятся максимально уменьшить, а объем меди – увеличить. В некоторых конструкциях, медью заменяют и часть стальной контактной головки (см. рис. 2.21, поз. 3).

3. Тепловой конус изолятора делают выступающим из корпуса на 1,5 – 2,0 мм и более за торец корпуса свечи зажигания, насколько позволяет стойкость центрального электрода и длина теплового конуса изолятора.

Первые два метода обеспечивают высокую теплопроводность свечи в целом, позволяют существенно увеличить длину теплового конуса изолятора без увеличения его максимальной рабочей температуры и следовательно улучшить тепловую характеристику. Выступление изолятора за торец корпуса ускоряет прогрев теплового конуса в зоне нижнего температурного предела.

Выступление теплового конуса изолятора за торец корпуса рекомендуется только для тех двигателей, где это не приводит к перегреву в зоне верхнего предела тепловой характеристики.

С другой стороны, при некоторых условиях, например на форкамерных или двухтактных двигателях, выступающий тепловой конус изолятора может оказаться в потоке горючей смеси переобогащенной топливом или моторным маслом, что приводит к усилению нагарообразования.

Известны случаи, когда свечи зажигания перегревались при работе на ДВС и в то же время покрывались нагаром.

Снижение уровня радиопомех. Искровой разряд свечи зажигания является источником радиопомех. Для подавления помех радиоприёму между центральным электродом и контактной головкой свечи встраивают резистор, который может быть двух типов: угольный стержень и специальный резистивный герметик.

Форкамерные свечи зажигания. Для обеспечения надёжного воспламенения сильно обедненных смесей разработаны свечи, в которых с помощью форкамер различной формы, расположенных внутри свечей, осуществляется завихрение разряда.

Известны различные варианты устройства свечи у которых рабочая камера выполнена в виде форкамеры. Их используют с целью улучшения сгорания рабочих смесей за счет «двухстадийной» организации процесса сгорания. «Форкамерные» свечи подобны свечам для спортивных форсированных двигателей, где электроды для защиты от перегрева установлены глубоко внутри рабочей камеры корпуса. Отличие заключается в том, что отверстие, соединяющее рабочую камеру («форкамеру») с цилиндром двигателя делают специальной формы. При сжатии свежая смесь поступает в форкамеру, искровой разряд возникает в области вихревого потока и образование первичного очага воспламенения становится интенсивнее. Благодаря этому обеспечивается быстрое распространение пламени в форкамере. Давление быстро возрастает и выбрасывает факел пламени, проникающий в камеру сгорания двигателя и интенсифицирующий воспламенение даже сильно обедненной рабочей смеси.

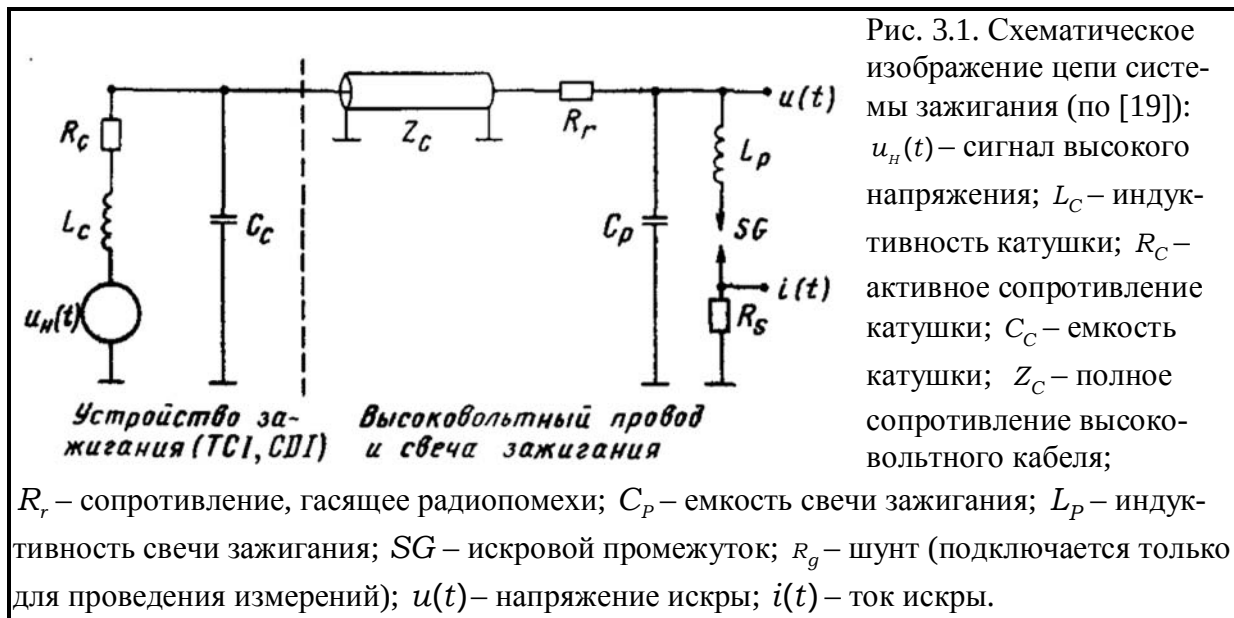
При перетекании горящих газов из форкамеры в цилиндр двигателя, в связи с турбулизацией горючей смеси, ускоряется и становится более эффективным процесс сгорания. Это, в свою очередь, может привести к улучшению показателей, характеризующих топливную экономичность и токсичность выхлопных газов.

Недостатки форкамерных свечей заключаются в том, что велико гасящее влияние электродов, а стойкость к образованию нагара мала. Вентиляция форкамеры затруднена, и горючая смесь в ней имеет неблагоприятный состав, так как содержит повышенное количество остаточных газов. При перетекании горящих газов из форкамеры в цилиндр возникают дополнительные тепловые потери.

Глава 3. Особенности электрофизических процессов в искровых свечах зажигания автомобильных ДВС.

3.1. Основные электрические характеристики искрового разряда

Большинство систем автомобильных систем зажигания можно разбить на два класса: системы CDI – с накоплением энергии в электрическом поле конденсатора и системы TCI – с накоплением энергии в магнитном поле катушки индуктивности. Универсальная схема системы искрового зажигания автомобильных бензиновых двигателей приведена на рис 3.1.



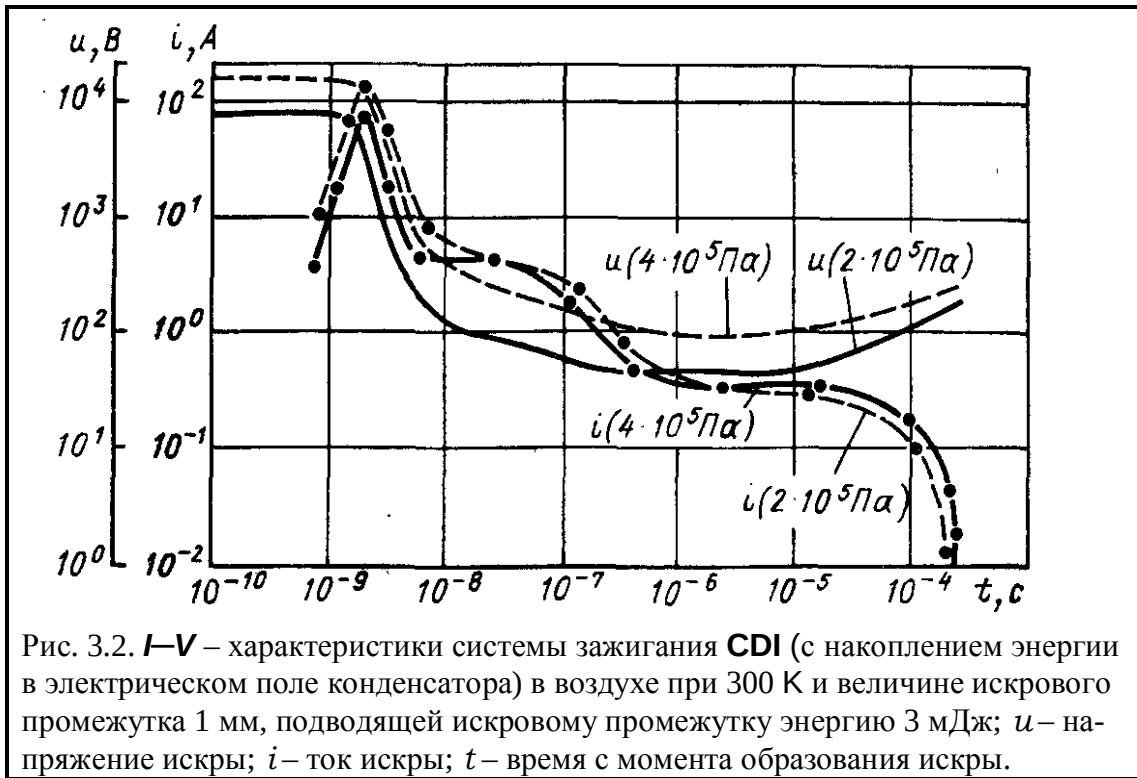
Электрические характеристики этих систем, полученные Р. Малу с сотрудниками [19], приведены на рис. 3.2 и рис. 3.3.

Можно выделить очень короткую (несколько наносекунд) первую фазу – фазу пробоя, во время которой сила тока искры увеличивается до первого максимума $I_{p \max}$ величиной в несколько сот ампер. Сила тока определяется напряжением зажигания U_0 и полным сопротивлением Z_p цепи около искрового промежутка, которое включает в свой состав эквивалентную емкость свечи $C_p \approx 10$ пФ, ее эквивалентную индуктивность $L_p \approx 5$ нГн и активное сопротив-

ление разрядного промежутка R_p . Теоретическую оценку R_p можно вычислить, воспользовавшись классической формулой Теплера

$$R_p = \Delta_p \frac{K}{\int_0^t I_p(t') dt'}, \quad (3.1)$$

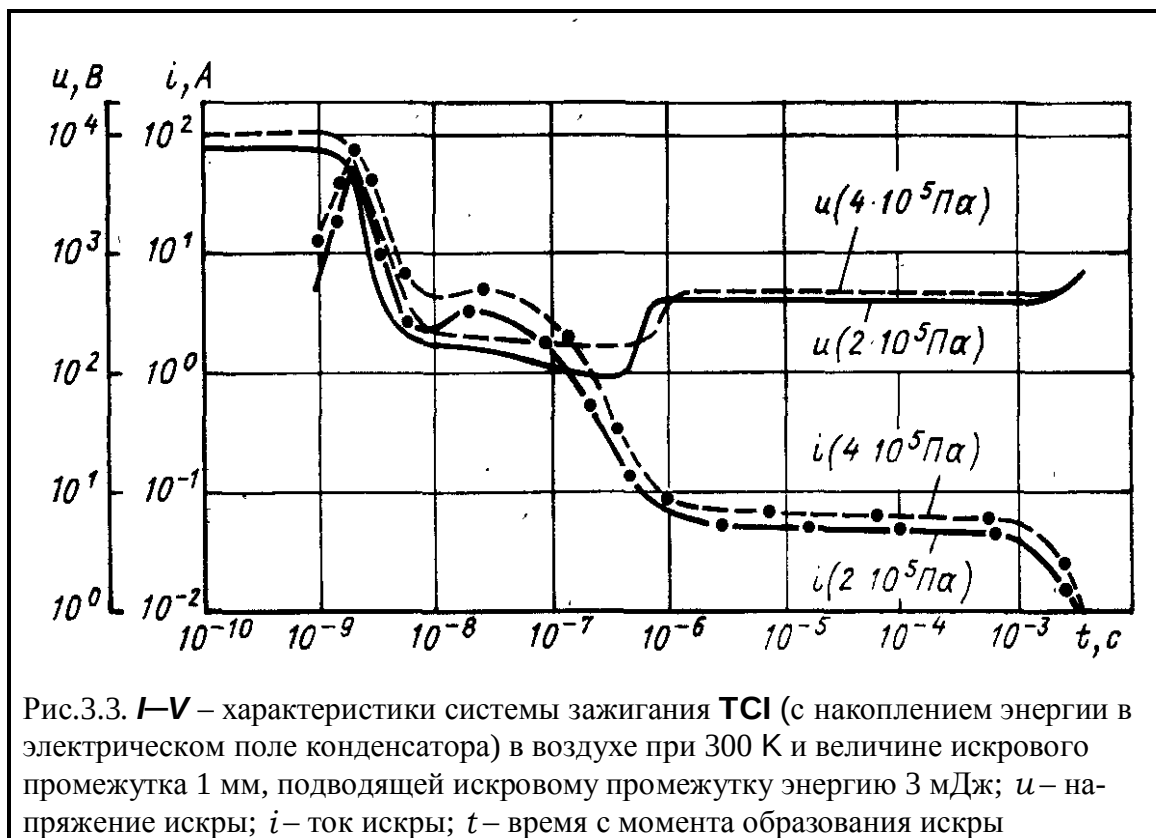
где Δ_p – длина разрядного промежутка, а K – постоянная Теплера.



За этой фазой следует вторая – дуговой разряд, которая длится примерно 1 мкс. В этот период времени емкость высоковольтных питающих проводов (40 – 100 пФ) и емкость катушки (≈ 50 пФ) разряжается через гасящее радиопомехи сопротивление R_r (1 – 10 кОм), соединенное последовательно с сопротивлением высоковольтных проводов ($Z_c \approx 200$ Ом). Согласно работе Р. Малу, цитированной выше, сила тока для этого второго этапа оценивается величиной ≈ 5 А.

Третья фаза – это фаза тлеющего разряда. Во время этой фазы накопитель энергии освобождает всю свою энергию. В системе зажигания с накоплением энергии в магнитном поле катушки индуктивности (системы TCI) тлеющий разряд длится несколько миллисекунд. В системах зажигания с накоплением

энергии в электрическом поле конденсатора (системы CDI) с большим внутренним сопротивлением также будет наблюдаться тлеющий разряд. Однако, если это сопротивление достаточно мало, то довольно длительное время может сохраняться ток значением более 200 мА. В промежуточном диапазоне (100 ÷ 200 мА) могут происходить быстрые



превращения дугового разряда в тлеющий разряд и наоборот. Согласно Малу [19], максимальные значения силы тока тлеющего и дугового разрядов в этой фазе оцениваются величинами $I_{pg} = 50$ мА (тлеющий разряд) и $I_{pa} = 200$ мА (дуговой разряд).

Указанные три фазы, или три типа разряда, однозначно характеризуются величинами высвобождаемых мощности и энергии. Во время пробоя уровень мощности максимален (до нескольких мегаватт) при достаточно малых уровнях энергии (0,3 – 1 мДж). Дуговой разряд характеризуется промежуточными значениями мощности и энергии, а тлеющий разряд происходит при минимальном уровне мощности (десятки ватт) и небольших уровнях энергии (30 – 100 мДж). Это, в первую очередь, объясняется длительностью тлеющего разряда.

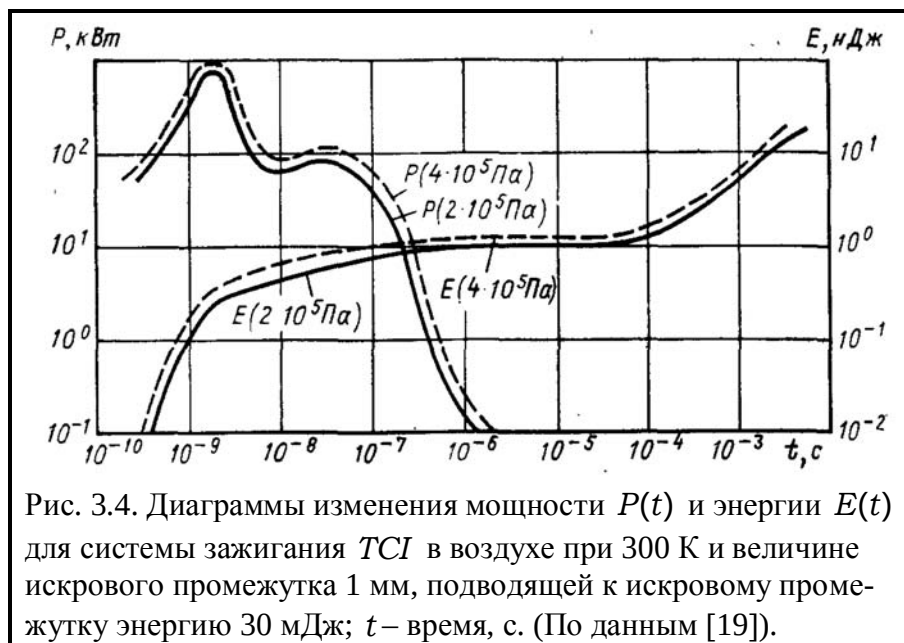
При работе любой системы зажигания имеют место эти три типа разряда, отличающиеся друг от друга значениями энергии и продолжительности. Если основные свойства этих типов разряда будут известны, то показатели системы зажигания не сложно определить по ее I – V -характеристике.

3.2. Типы разряда между электродами свечи зажигания и их физические характеристики

Предпробой. Первоначально газ, находящийся в промежутке между электродами свечи зажигания, является идеальным изолятором. При приложении импульса напряжения (со скоростью ≈ 10 кВ/мс в системах с накоплением энергии в магнитном поле катушки индуктивности и со скоростью ≈ 100 кВ/мс в системах с накоплением энергии в электрическом поле конденсатора), случайные электроны, попавшие с проникающим ионизирующим космическим излучением, могут получать энергию в растущем электрическом поле и ускоряться в направлении анода. При достаточно высокой (50 – 100 кВ/см) напряженности электрического поля эти электроны ионизируют сталкивающие с ними молекулы газа, порождая дополнительные свободные электроны и ионы. Эти носители зарядов также получают энергию от электрического поля и порождают при столкновении с молекулами газа заряженные частицы следующего поколения и т.д. Число электронов и ионов растет лавинообразно. Однако, поскольку эти электроны поглощаются анодом, нужны какие-то дополнительные механизмы образования достаточного количества свободных электронов у катода или на нем, чтобы движение электронов было самоподдерживающимся. Таким механизмом является ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 200$ нм), испускаемое возбужденными ионами. Особенно важную роль при этом играют возбужденные молекулы азота N_2 и молекулы некоторых углеводородов. Таким образом, процессы ионизации, начинающиеся в результате создания электрического поля, быстро ускоряются, ток в искровом промежутке становится самоподдерживающимся и почти не зависящим от внешнего электрического поля. До тех пор, пока в процессе ионизации электронов образуется меньше, чем это необходимо,

чтобы разряд был самоподдерживающимся, фаза разряда будет фазой *предпробоя*.

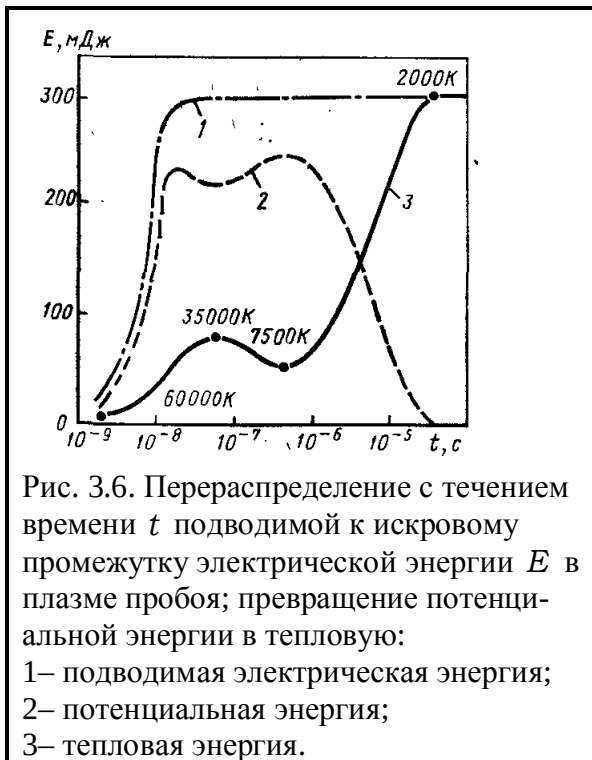
Пробой. По мере того, как вырабатывается достаточное количество электронов обратной связи, происходит сверхэкспоненциальное увеличение силы тока разряда под действием объемного заряда, образующегося в проводящих каналах – стримерах. Практически это происходит, когда сила тока превышает ≈ 10 мА. Поскольку ток ничем не ограничивается, в течение нескольких наносекунд его сила увеличивается до нескольких сотен или тысяч ампер. Увеличение продолжается, пока ему не будет препятствовать сопротивление разряда и внешней цепи вблизи искрового промежутка (т.е. свечи зажигания). На этом этапе напряжение в искровом промежутке и напряженность электрического поля быстро уменьшается до очень малых значений (100 В и 1 кВ/см соответственно, т.е. происходит пробой). Минимальная энергия, необходимая для начала фазы пробоя при давлении 1 бар (10^5 Па) и зазоре между электродами в 1 мм, составляет 0,3 мДж.



Во время пробоя через часть объема, обладающую повышенной электропроводностью, проходит все более интенсивный ток. Плотность ионов увеличивается от 10^{15} э/см³ до 10^{19} э/см³, так что доминирующим процессом потери энергии ускоренными электронами становится обмен энергией между электронами и ионами, обусловленный действием сил Кулона. В результате осуществ-

ляется передача электроэнергии из емкости разрядника через электрическое поле электронам и ионам. Это изображено на рис 3.4. и рис. 3.5.

Указанные процессы сосредоточены в узком канале, начальный диаметр которого равен 40 мкм, что соответствует величине диаметров стримеров, образующихся во время предпробоя. Все тяжелые частицы внутри этих каналов полностью диссоциируются, ионизируются и сильно возбуждаются, так что внутренняя энергия одной тяжелой частицы составляет более 20 эВ по сравнению с 5,5 эВ тепловой энергии (при $T=60000$ К). Это показано на рис. 3.6. Поскольку при этом возможно возбуждение более высоких уровней энергии электронов, не трудно видеть, что при пробое могут накапливаться большие запасы энергии (гораздо большие, чем только за счет повышения температуры). Вследствие чрезвычайно быстрого повышения температуры газа до 60 000 К давление в канале почти мгновенно растет до нескольких сотен бар ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$), вызывая распространение интенсивной ударной волны. Сам канал расширяется при этом со сверхзвуковой скоростью. В процессе этого расширения канал охлаждается, и, поскольку в каждый момент времени соблюдается тепловое равновесие, и накопленная в канале потенциальная энергия постепенно превращается в тепловую энергию, что обеспечивает процесс расширения. Часть энергии ($\approx 30\%$), отводимая с ударной волной, вскоре возвращается назад, поскольку сферические ударные волны быстро передают заключенную в них энергию молекулам газа, расположенным внутри сферы достаточно малого радиуса ($d \approx 2$ мм), в которой впоследствии формируется плазма пробоя. Так как рекомбинация представляет собой процесс, в котором участвуют три тела, после того как плотность упадет до очень малых значений, будет иметь место повышенная концентрация радикалов. Физические процессы, происходящие при пробое, можно описать при помощи уравнений баланса мощности для всей разрядной цепи, найденные С.И. Брагинским [10].



Для этого введем следующие обозначения:

$i(t)$ – сила тока; R – сопротивление, эквивалентное мощности активных потерь всей разрядной цепи; C – емкость разрядной цепи; L – индуктивность разрядной цепи; U – напряжение на емкости; Δ – длина искрового канала; a – радиус искрового канала; $R_{sp} = \Delta / (\pi a^2 \sigma)$ – сопротивление искрового канала; σ – удельная электропроводность плазмы; w – внутренняя энергия плазмы в канале единичной

длины; ρ_0 – начальная плотность газа, в котором происходит разряд; P – давление плазмы на границе канала; $K_p \approx 0,9$ – коэффициент сопротивления. Тогда уравнения Брагинского записываются в виде:

$$i^2 R + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C U^2 \right) = 0, \quad (3.2)$$

$$\frac{i^2 R_{sp}}{\Delta} = \frac{dw}{dt} + P \frac{d}{dt} (\pi a^2), \quad (3.3)$$

$$P = K_p \rho_0 \left(\frac{da}{dt} \right)^2. \quad (3.4)$$

Как показывает анализ экспериментальных результатов [19], через несколько десятков микросекунд максимальная температура плазмы падает до величины ≈ 3500 К, и к этому моменту времени почти вся потенциальная энергия превращается тепловую энергию, сосредоточенную в достаточно большом тороидальном объеме, в центре которого имеется пузырек холодного газа, эффективно изолирующий плазму от поглощающих тепло электродов. Этот пузырек является результатом центростремительного течения холодного газа, обусловленного тем, что в ударной волне вслед за фронтом повышенного давления движется фронт разрежения. Как только он возникает, силы трения между газом и поверхностью электродов вызывают течение холодного газа в область, занимаемую электродами. Скорость этого течения пропорциональна корню квадратному из перепада давлений. Поскольку вязкость газа достаточно мала, этот поток холодного газа будет продолжаться и после прохождения волны разрежения.

Дуговой разряд. Электрической дуге всегда предшествует пробой, в процессе которого создается достаточно высокая для ее образования электрическая проводимость. Электрическая дуга характеризуется токами, сила которых превышает 100 мА и ограничивается лишь величиной внешнего сопротивления. Напряжение горения очень мало (≈ 50 В при давлении воздуха 1 бар и искровом промежутке 1 мм). Оно состоит из катодного падения напряжения ≈ 15 В, напряжения дуговой плазмы ≈ 10 В и анодного падения напряжения ≈ 25 В. Катодное падение требуется для поддержания большого количества катодных пятен (с температурой T порядка 3000 К, т.е. температуры испарения материала катода при давлении окружающей среды) расплавленного материала диаметром

10–40 мкм. Электроны, излучаемые пятнами, нужны для поддержания электрической дуги. Без таких пятен расплавленного металла дуга не может существовать, и все меры по их охлаждению приведут либо к увеличению катодного падения и образованию новых пятен, либо к угасанию дуги.

Вследствие высокой температуры катодных пятен происходит значительное испарение материала катода. Согласно результатам экспериментов [19], скорость эрозии при дуговом и тлеющем разрядах значительно выше, чем при пробое, и увеличивается с увеличением искрового промежутка, поскольку более высокое напряжение разряда является причиной накопления большого количества энергии в емкостях катушки и проводов, которая высвобождается, главным образом, при дуговом разряде. Для пробоя справедливо противоположное утверждение. Увеличение размеров искрового промежутка способствует увеличению продолжительности фазы пробоя, и, таким образом, уменьшению энергии, сохраняемой для последующей фазы дугового разряда. В оптимальных конструкциях отрицательная роль последующего дугового разряда может быть уменьшена, из-за чего появляется возможность достижения скоростей эрозии, значительно меньших, чем при дуговых разрядах. Благодаря этому возможно довольно значительное продление срока службы свечей зажигания.

Стационарные значения плотности электронов и температуры в центре дуги составляют соответственно 10^{27} э/см и 5000–6000 К, причем они слабо зависят от силы тока дуги. Вследствие этого основной эффект следующей за пробоем дуги заключается не в усилении характерных проявлений пробоя, а в снижении плотности электронов и температуры и доведении их до свойственных дуговому разряду значений. Уменьшение подвода энергии и снижение плотности электронов приводит к значительному замедлению энергообмена между электронами и тяжелыми частицами. В результате дуговой разряд приобретает характер чисто теплового процесса, и поэтому энергия передается поверхности плазмы благодаря теплопроводности и диффузии, а не суперсжатию. Эти процессы сравнительно медленны (миллисекунды), и их эффективность

снижается по мере роста радиуса канала, по которому подводится энергия.

Следствием этого является гауссов профиль температуры.

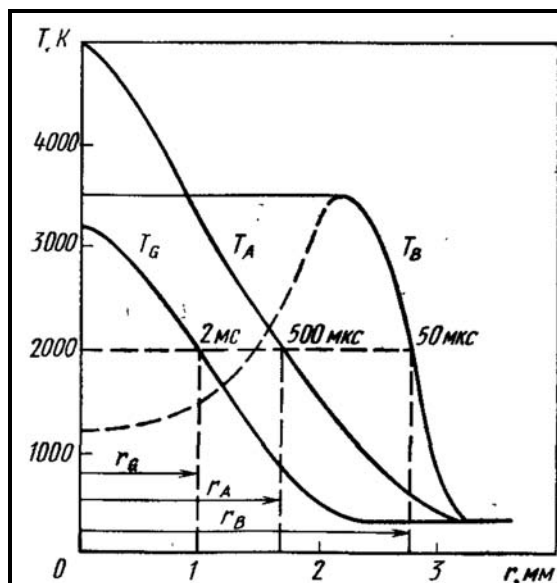


Рис. 3.8. Изменение вдоль радиуса r температуры плазмы пробоя T_B , дугового T_A и тлеющего T_G разрядов соответственно в воздухе при 300 К, давлении 1 бар и величине искрового промежутка 1 мм. Вследствие различия уровней мощности, окончательный профиль температур достигается в разные моменты времени. Профиль температур плазмы пробоя соответствует моменту прекращения расширения. Величины r_B , r_A и r_G — это предполагаемые значения радиусов плазмы при температуре пламени 2000 К.

Поскольку температура при этом близка к ≈ 6000 К, степень диссоциации достаточно высока, не смотря на низкие уровни ионизации. Это, однако, характерно для очень малой области оси канала, т.к. температура быстро падает.

Окончательный профиль температуры показан на рис. 3.8. Продолжительный и интенсивный контакт плазмы дуги с электродами является причиной значительных потерь тепла вследствие теплопроводности. Подробные данные приведены ниже в табл. 3.1.

Тлеющий разряд. Тлеющий

разряд при высоком давлении очень схож с дуговым разрядом, за исключением того, что катод при этом холоден. Электроны обратной связи являются электроны, образующиеся в результате столкновения ионов. Поскольку эффективность процесса невысока, плотности и значения силы тока малы (<100 мА). В то время как при низких давлениях значительные участки поверхности катода

Табл. 3.1. Энергетический баланс плазмы пробоя, дугового и тлеющего разрядов в идеальных условиях (электроды очень малы)

	Пробой	Дуговой разряд	Тлеющий разряд
Потери излучением	$<1\%$	$\approx 5\%$	$<1\%$
Потери вследствие теплопроводности электродов	$\approx 5\%$	$\approx 45\%$	$\approx 70\%$
Полные потери	$\approx 6\%$	$\approx 50\%$	$\approx 70\%$
Энергия плазмы	$\approx 94\%$	$\approx 50\%$	$\approx 30\%$

подвергаются действию катодного механизма, высокие давления способствуют локализации этих участков и, таким образом, переходу к режиму дугового разряда. То же самое происходит в случае увеличения силы тока до значений, больших ≈ 100 мА. В результате будут образовываться горячие катодные пятна. Вследствие значительной продолжительности разряда (до нескольких миллисекунд) его можно считать стационарным разрядом и применять для его описания теоретические модели, разработанные для описания разрядов при высоких давлениях в газах. Величина катодного падения напряжения, необходимого для излучения достаточного числа электронов обратной связи, составляет ≈ 400 В и зависит не от давления и температуры, а от состава газовой смеси и поверхностных слоев катода.

Поскольку область катодного падения напряжения сосредоточена в непосредственной близости у поверхности катода ($< 0,1$ мм), почти вся энергия, поступающая в этот слой, передается катоду. Из-за длительности процесса горения, значительная часть энергии, поступающей в тлеющий разряд, опять теряется (до 50% в неподвижном газе при $p=1$ бар и искровом промежутке 1 мм).

Таблица 3.2. Зависимость скорости эрозии латунных контактов от величины искрового промежутка при пробое, дуговом и тлеющем разрядах в воздухе при температуре 300 К и давлении 1 бар.

Тип разряда	Искровой промежуток l , мм	Подводимая энергия E_{el} , мДж	Эрозия за 10^6 разрядов	
			масса, г	Масса, г·мДж
Тлеющий разряд; 3,4 мс, 500 В.	0,5	33	$0,89 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
	1,0	37	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
	2,0	41	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Дуга малой энергии; 100 мкс.	0,5	1,6	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$15,6 \cdot 10^{-6}$
	1,0	1,76	$0,32 \cdot 10^{-4}$	$18,2 \cdot 10^{-6}$
	2,0	1,17	$0,29 \cdot 10^{-4}$	$24,8 \cdot 10^{-6}$
Дуговой разряд; 100 мкс, 100 В.	0,5	185	$333,0 \cdot 10^{-4}$	$180,0 \cdot 10^{-6}$
	1,0	115	$242,0 \cdot 10^{-4}$	$210,0 \cdot 10^{-6}$
	2,0	67	$150,0 \cdot 10^{-4}$	$223,0 \cdot 10^{-6}$
Дуговой разряд; 100 мкс, 200 В.	0,5	278	$467,0 \cdot 10^{-4}$	$168,0 \cdot 10^{-6}$
	1,0	225	$442,0 \cdot 10^{-4}$	$196,0 \cdot 10^{-6}$
	2,0	236	$483,0 \cdot 10^{-4}$	$204,0 \cdot 10^{-6}$
Пробой; 5 нс, 20 кВ.	0,5	40	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$16,0 \cdot 10^{-6}$
	1,0	40	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$12,0 \cdot 10^{-6}$
	2,0	40	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$

Плотность электронов и температура ядра в установившемся состоянии равны $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и 3000 К соответственно. Механизм переноса энергии из ядра к поверхности плазмы аналогичен такому же механизму при дуговом разряде. Таким образом, канал тлеющего разряда представляет собой как бы нагретую проволоку с гауссовским профилем температуры

$\left(T(r) \propto \exp\left[-(r/k)^2\right]\right)$ по сечению. Интенсивность эрозии мала и обусловлена в основном распылением катода. Она пропорциональна количеству электричества, пропущенного через рабочий зазор. Длительность процесса горения обуславливает его чувствительность к газовым потокам в цилиндре ДВС. При скоростях потоков до 15 м/с в процессе разряда образуется достаточное количество новых электронов и ионов для плавного увеличения канала разряда, при этом пропорционально увеличивается напряжение горения. При более высоких скоростях потоков длина канала может достичь такой величины, что напряжение в искровом промежутке станет больше требуемого для образования новой искры между электродами еще до высвобождения энергии катушки зажигания. Это напряжение повторного зажигания мало ($\approx 2-3 \text{ кВ}$), поскольку у катода имеется достаточное количество электронов и ионов. Таким образом, начальный разряд прерывается и последовательно образуются искры, каждая из которых начинается с фазы пробоя. Из-за меньшей напряженности поля и значительной предионизации, состояние плазмы соответствует фазе перехода от заключительного этапа пробоя к дуговому разряду. При этом каналы разряда отдаляются друг от друга, а энергия каждого из них является лишь частью полной электрической энергии. Эффективная длина разряда может более чем в 20 раз превышать длину искрового промежутка. Часть плазмы, образовавшаяся ранее, обладает значительно большей энергией, чем ее часть, прилегающая к электродам. Увеличение напряжения горения, как отмечено в работе [19], может служить характеристикой газовых потоков в окрестности свечи зажигания.

3.3. Эффективность передачи энергии

Описанные выше физические свойства различных типов разряда обуславливают то обстоятельство, что лишь часть электрической энергии из искрового промежутка фактически может быть передана топливовоздушной смеси для ее воспламенения. На рис. 3.9, заимствованном из [19], приведены данные для тлеющего и дугового разрядов в неподвижном воздухе. На этом рисунке явно выражено влияние потерь теплоты в электроды, а также влияние анодного и катодного напряжения. Если только длительность разряда не становится очень малой (<10 мкс), характеристики передачи энергии не зависят от фактических значений силы тока и времени.

При пробое (рис. 3.10) возможно достижение очень высокой эффективности передачи энергии ($>80\%$), однако при увеличении количества энергии наблюдается тенденция снижения эффективности. Эта тенденция

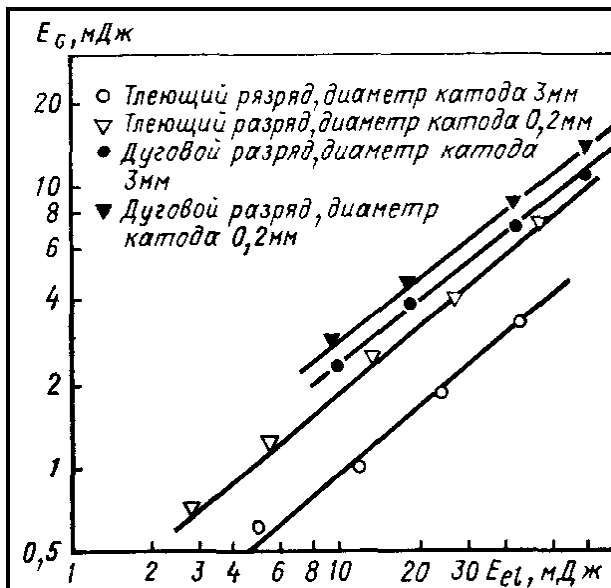


Рис. 3.9. Зависимость количества передаваемой смеси энергии E_G от количества электрической энергии E_{el} , поступающей в искровой промежуток, для дугового и тлеющего разрядов. При длительности разрядов ≥ 10 мкс существенной зависимости эффективности передачи энергии от нее и (или) силы тока не обнаружено.

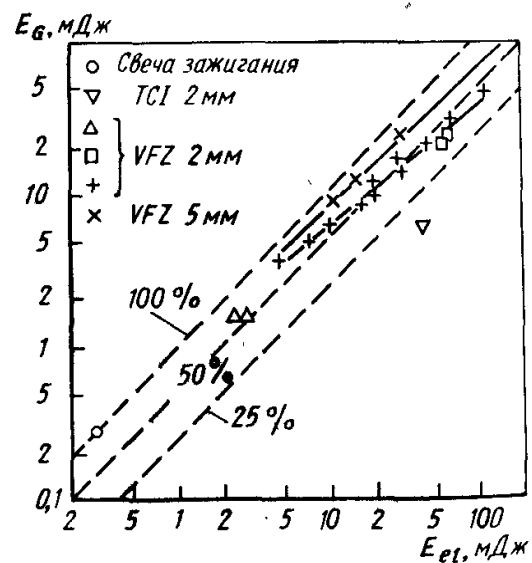


Рис. 3.10. Зависимость количества передаваемой энергии E_G от количества электрической энергии E_{el} , поступающей в искровой промежуток, для пробоя (экспериментальная система зажигания VFZ). С целью сравнения приведены также данные для системы зажигания TCI (30 мДж, 2 мкс).

обусловлена увеличением продолжительности последующей фазы дугового разряда в случае, если конструкция устройства зажигания, в котором разряд осуществляется в форме пробоя, не позволяет достаточно быстро передать всю энергию, накопленную за время пробоя.

Для реальных двигателей неподвижное состояние газовой среды не характерно, и скорости движения топливоздушнoй смеси могут быть достаточно высокими, особенно при достижении поршнем ВМТ. Данные, иллюстрирующие влияние течения рабочего тела на эффективность передачи энергии, приведены на рис. 3.11. При пробое этого влияния совсем нет, поскольку энергия передается за несколько наносекунд (например при скорости потока 100 м/с канал разряда за 10 нс переместится не более чем на 1 мкм).

При тлеющем и дуговом разрядах влияние заметно, поскольку канал разряда под воздействием потока смещается и соответственно удлиняется.

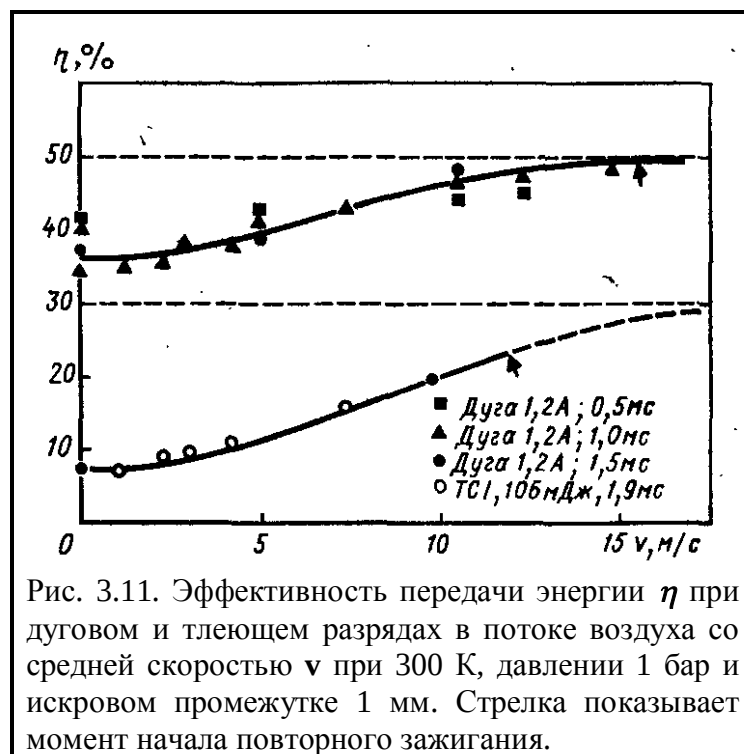


Рис. 3.11. Эффективность передачи энергии η при дуговом и тлеющем разрядах в потоке воздуха со средней скоростью v при 300 К, давлении 1 бар и искровом промежутке 1 мм. Стрелка показывает момент начала повторного зажигания.

Если скорость потока менее 15 м/с, происходят повторные зажигания, число которых увеличивается, так что энергия распределяется между многочисленными независимыми каналами разрядов. Вследствие этого можно считать, что дуговой и тлеющий разряды имеют разветвленную форму, почти не зависящую от фактической величины искрового промежутка.

В результате удлинения канала разряда под влиянием потока газов отношение напряжения плазмы к величине анодного напряжения уменьшается, а его отношение к величине катодного напряжения увеличивается.

При этом уменьшаются потери теплоты в электроды, вследствие чего газу передается большее количество энергии, но в менее концентрированном виде: чем больше величина канала разряда, тем меньше радиус окружающей его области, в которой выполняются условия зажигания. Максимальная эффективность передачи энергии в идеальных условиях, которым соответствуют данные, приведенные в табл. 3.1, будет достигаться при скоростях потока, близких к 15 м/с. При более высоких скоростях эффективность передачи энергии от отдельных каналов будет близка к соответствующим идеальным условиям значений 30% и 50% для тлеющего и дугового разрядов соответственно, поскольку удлинение канала разряда при повторных зажиганиях способствует сохранению высокой эффективности передачи энергии.

Следует, однако, иметь в виду, что полное количество передаваемой энергии не может непосредственно служить мерой энергии, затрачиваемой на воспламенение у поверхности плазмы, поскольку ее величина зависит также от распределения температуры (см. рис. 3.8) и формы плазмы (радиуса зажигания и площади поверхности).

3.4. Электрический разряд по поверхности диэлектрика (перекрытие) в свечах зажигания

Наряду с электрическим разрядом в газе, происходящем в искровом промежутке свечи зажигания и рассмотренном выше, в свече имеют место электрические разряды на поверхности газ – изолятор. Для обозначения этих процессов в литературе [3] используются термины «скользящий разряд», «поверхностный разряд» и «перекрытие».

Построим простейшую математическую модель скользящего разряда на поверхности изолятора свечи зажигания. Для этого введем цилиндрическую систему координат $\{\rho, \varphi, z\}$, направив ось OZ по оси центрального электрода,

и представим свечу в виде коаксиальной системы тел, состоящей из идеально проводящего цилиндра радиуса r , которым является центральный электрод и диэлектрического тела вращения переменного радиуса $R(z)$, которым является изолятор свечи. Принимаем, что поверхность свечи обладает конечной электрической проводимостью σ_s . Она обусловлена следующими причинами: во-первых, на поверхности изолятора расположен двойной электрический слой, наружная «обкладка» которого содержит слабо связанные электроны, которые под воздействием нормальной к поверхности составляющей E_n напряженности электрического поля могут покинуть поверхность изолятора и под воздействием его тангенциальной составляющей E_τ переместиться вдоль поверхности изолятора на некоторое расстояние (перепрыгнуть); во-вторых, поверхность изолятора содержит электропроводящие загрязнения (нагар, пары жидкостей, соли и т.д.). Учитывая вышесказанное, допустимо рассматривать электрофизические процессы в искровой свече зажигания, как процессы в кабеле с (плохо) проводящей оболочкой.

Для описания электрофизических свойств свечи введем следующие параметры: — погонную емкость изолятора C_v , Ф/м, определяемую известным из курса теоретических основ электротехники соотношением (см. [17], стр. 492)

$$C_v = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R(z)}{r}}; \quad (3.5)$$

— погонное сопротивление утечки через изолятор R_v , Ом/м, вызванное несовершенством диэлектрика;

— погонную индуктивность L_s , Гн/м, которую определим так же как индуктивность коаксиального кабеля формулой

$$L_s = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{R(z)}{r}; \quad (3.6)$$

— погонное сопротивление поверхности изолятора R_s , Ом/м, которое будем аппроксимировать формулой, аналогичной формуле Теплера

$$R_S = R_{S0} + \frac{K_S}{\int_0^t I_S(t') dt'}, \quad (3.7)$$

где константа K_S зависит от марки материала изолятора, состояния его поверхности (влаги, нагар и т.п.) и состава окружающей газовой среды, а слагаемое R_{S0} характеризует поверхностное сопротивление изолятора, Ом/м, в режиме пробоя.

Электрическая схема замещения этой модели показана на рис. 3.12 и отличается от схемы, которую предложил проф. Балагуров в работе [3], добавлением индуктивности L_S и аналитическим выражением для сопротивления R_S .

Выделим на расстоянии z от начала координат участок модели длиной dz и выпишем уравнения электрического равновесия для рассматриваемого участка. Имеем

- входное напряжение U ;
- напряжение на центральном электроде U_0 ;
- выходное напряжение $U + (\partial U / \partial z) dz$;
- входной ток I ;
- выходной ток $I + (\partial I / \partial z) dz$.

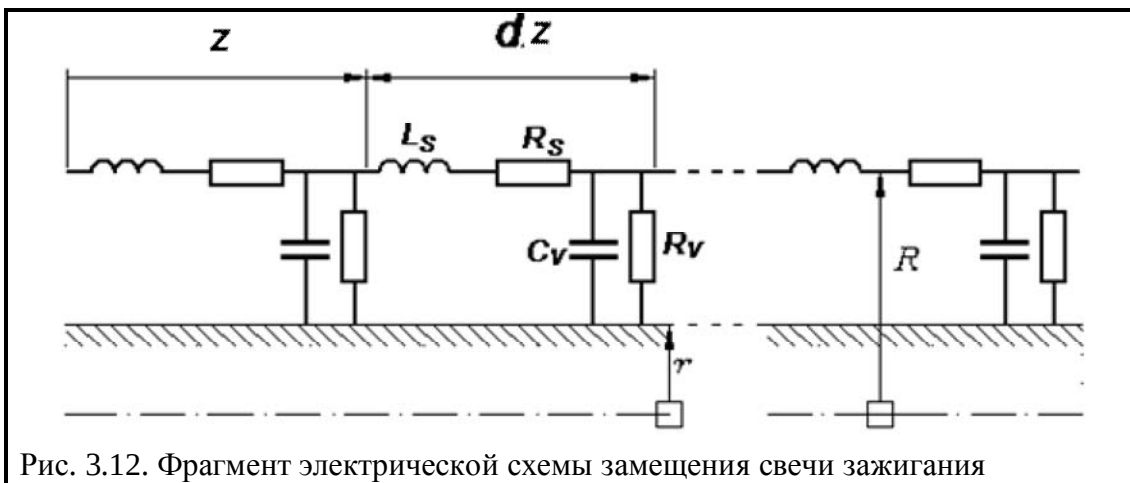


Рис. 3.12. Фрагмент электрической схемы замещения свечи зажигания

Составляем для схемы рис. 3.12 уравнения электрического равновесия.

- Баланс токов:

$$I + \frac{\partial I}{\partial z} dz = I + \left[\frac{U_0 - U}{R_v} + C_v \frac{\partial (U_0 - U)}{\partial t} \right] dz. \quad (3.8)$$

— Баланс напряжений:

$$U + \frac{\partial U}{\partial z} dz = U - \left(R_s I + L_s \frac{\partial I}{\partial t} \right) dz. \quad (3.9)$$

При выводе этих уравнений использовано допущение о том, что ток утечки через изолятор намного меньше тока через центральный электрод, сопротивление которого в свою очередь бесконечно мало. Приведя в уравнениях (3.8) и (3.9) подобные члены и разделив на dz , получаем:

$$C_v \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} + \frac{U}{R_v} = C_v \frac{\partial U_0}{\partial t}, \quad (3.10)$$

$$L_s \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} + R_s I = 0. \quad (3.11)$$

Выписанные выше уравнения (3.10) и (3.11) описывают изменение тока и напряжения на поверхности изолятора свечи зажигания вплоть до момента пробоя ее разрядного промежутка. Они представляют собой систему дифференциально-функциональных (из-за описания $R_s(I)$ уравнением (3.7)) уравнений в частных производных. Для того, чтобы можно было использовать для решения уравнений (3.10) и (3.11) аналитические и численные методы теории дифференциальных уравнений, необходимо изменить способ записи уравнения (3.7), определяющего сопротивление R_s . Для этого введем вспомогательную неизвестную функцию $Q(t, z)$, определяемую формулой

$$Q(t, z) = \int_0^t I(t', z) dt' \quad (3.12)$$

и имеющую смысл линейной плотности электрических зарядов на поверхности изолятора. Подставляя (3.12) в уравнение (3.7) и учитывая очевидное равенство

$$I(t, z) = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t I(t', z) dt', \quad (3.13)$$

Получаем вместо уравнений (3.10) и (3.11) систему нелинейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial z} + C_v \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R_v} = C_v \frac{\partial U_0}{\partial t}, \\ L_s \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \left(R_{s0} + \frac{K_s}{Q} \right) \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (3.14)$$

В рассматриваемой модели напряжение U_0 на центральном электроде не зависит от координаты z , а его изменение во времени определяется выходными характеристиками системы зажигания, т.е. U_0 рассматривается, как заданная функция времени t .

Для решения системы уравнений (3.14) необходимо определить граничные условия для функций $U(t, z)$ и $Q(t, z)$ при $z = 0$, т.е. описать функции $U(t, 0)$ и $Q(t, 0)$ а также задать начальные условия для этих функций. Из физических соображений следует, что в качестве граничного условия для функции $U(t, z)$ можно выбрать условие

$$U(t, 0) = U_0(t), \quad (3.15)$$

означающее, что в зоне сопряжения изолятора с контактной головкой напряжения на его поверхности и на поверхности центрального электрода одинаковы.

При достаточно малых значениях нормальной к поверхности изолятора напряженности электрического поля, можно пренебречь, и рассматривать механизм поверхностной проводимости, положив, следуя монографии [3]

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi R}, \quad (3.16)$$

где ρ_s – удельное поверхностное сопротивление материала изолятора.

При этом уравнение (3.11) становится линейным дифференциальным уравнением, и вместо нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка (3.14) получаем линейную систему двух уравнений первого порядка, коэффициенты которых зависят от z .

$$\begin{cases} C_V \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} + \frac{U}{R_V} = C_V \frac{\partial U_0}{\partial t}, \\ L_S \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} + R_S I = 0. \end{cases} \quad (3.17)$$

Систему уравнений (3.17) уже можно решить каким либо численно-аналитическим методом, используя сравнительно не большие ресурсы вычислительных систем. Например, учитывая, что процесс искрообразования – процесс периодический, можно представить функции $U(t, z)$, $I(t, z)$ и $U_0(t)$ в виде конечных рядов Фурье:

$$U(t, z) = \sum_{n=-N}^{n=N} u_n(z) \exp(j \omega t), \quad (3.18)$$

$$I(t, z) = \sum_{n=-N}^{n=N} i_n(z) \exp(j \omega t), \quad (3.19)$$

$$U_0(t) = \sum_{n=-N}^{n=N} u_{0,n} \exp(j \omega t), \quad (3.20)$$

где n – номер гармоники, N – число учитываемых гармоник, $j = \sqrt{-1}$, а ω – угловая частота.

При этом уравнения (3.17) заменяются N системами обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{di_n(z)}{dz} + \frac{1+j n\omega R_V C_V}{R_V} u_n(z) = j n\omega C_V u_{0,n}, \\ \frac{di_{-n}(z)}{dz} + \frac{1-j n\omega R_V C_V}{R_V} u_{-n}(z) = -j n\omega C_V u_{0,n}, \\ \frac{du_n(z)}{dz} + (j n\omega L_S + R_S) i_n(z) = 0, \\ \frac{du_{-n}(z)}{dz} + (R_S - j n\omega L_S) i_n(z) = 0. \end{cases} \quad (3.21)$$

Глава 4. Методика и алгоритмы численного моделирования теплового состояния свечи зажигания

4.1. Постановка задачи

Основным фактором, определяющим тепловую характеристику СЗ, является мощность теплового потока, отдаваемая такими элементами её конструкции, как тепловой конус изолятора, а также центральный и боковые электроды, прилегающему слою топливовоздушной смеси в камере сгорания бензинового двигателя на такте сжатия. Недостаточная мощность этого потока приводит к образованию нагара. Если же его мощность выше некоторого критического значения, в прогретом объёме смеси резко ускоряются предпламенные реакции и происходит самовозгорание, приводящее к появлению самораспространяющегося пламени, т.е. к калильному зажиганию (КЗ).

Минимальный объём ΔV_f "зародыша" пламени зависит от состава топливовоздушной смеси и газодинамических условий в цилиндре. Он может быть вычислен по методике, предложенной Б. Льюисом и Г. фон Эльбе [18]. Пусть Δt_q – время, необходимое для нагрева этого объёма до температуры T_q , при которой начинают идти предпламенные реакции, рассчитываемое по условиям теплоотдачи нагретых элементов конструкции СЗ топливовоздушной смеси в цилиндре, а ρ_q – давление в цилиндре в этот момент времени. Тогда момент t_{ign} возникновения КЗ, отсчитываемый от момента закрытия впускного клапана можно подсчитать по формуле

$$t_{ign} = \Delta t_q + 19.75 \left(\frac{ON}{100} \right)^{3.4107} \rho_q^{-1.7} \exp \left(\frac{3800}{T_q} \right), \quad (4.1)$$

где ON – октановое число бензина.

Условием возникновения КЗ в цилиндре бензинового двигателя является при этом выполнение очевидного неравенства

$$\frac{180 - \varphi_a - \theta}{6n} > t_{ign} \quad (4.2)$$

где φ_a – угол запаздывания закрытия впускного клапана, градусов ПКВ, θ – угол опережения зажигания, а n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} . Неравенство (4.2) означает, что самовозгорание бензовоздушной смеси (КЗ) происходит раньше момента искрообразования.

Для того чтобы оценить тепловую характеристику СЗ необходимо выполнить численное моделирование рабочего цикла ДВС, сопровождаемое расчетом мгновенного распределения температур $T(t, x, y, z)$ в теле СЗ и на ее поверхности и интенсивности тепловых потоков между СЗ и прилегающими к ней частями рабочего тела.

Выполнение такой программы в полном объеме требует вычислительных ресурсов, недоступных даже современным суперЭВМ. Поэтому для эффективного моделирования тепловых процессов необходимо упростить постановку задачи.

Для этого принимаем, что оценку тепловой характеристики СЗ целесообразно проводить для установившегося наиболее нагруженного режима работы ДВС, а решение задачи численного моделирования разбиваем на два этапа, на первом из которых выполняется расчет рабочего цикла в цилиндре двигателя, а на втором – выполняется расчет распределения температуры и тепловых потоков в элементах конструкции СЗ.

Можно показать, что численное моделирование рабочего цикла ДВС допустимо выполнить в предположении, что температура элементов огневого ограждения цилиндра (головки цилиндра, огневой поверхности поршня, боковой поверхности цилиндра) не зависят от угла поворота коленчатого вала, в то время как температура рабочего тела меняется на порядок: $T_{\min} \approx 300^\circ \text{ К}$; $T_{\max} \approx 3000^\circ \text{ К}$. Для этой цели рассмотрим уравнение распространения тепла

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad } T), \quad (4.3)$$

где ρ $[\text{кг/м}^3]$ – плотность вещества, c $[\text{Дж/м}^3]$ – его теплоемкость, а λ $[\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}]$ – коэффициент теплопроводности.

Теплофизические параметры ρ , c и λ металлических элементов конструкции практически не зависят от температуры T . Поэтому для элементов огневого ограждения цилиндра уравнение (4.3) переходит в линейное уравнение

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4.4)$$

где $\chi = \lambda / (\rho c_v)$ – коэффициент температуропроводности.

Из теории ДВС известно, что теплообмен на границе между рабочим телом и огневой поверхностью цилиндра происходит по закону Ньютона

$$\lambda \frac{\partial T_w}{\partial n} = \alpha_w (T_w - T_\infty), \quad (4.5)$$

где T_w – температура поверхности, T_∞ – температура рабочего тела в цилиндре, $\partial/\partial n$ – производная по нормали к поверхности, а α_w – коэффициент теплообмена (теплоотдачи) между рабочим телом и огневой поверхностью цилиндра.

Коэффициент α_w вычисляется по формуле, предложенной проф. Вошни (детальные ссылки – в монографии [13]):

$$\alpha_w = 0,12793 \cdot 10^{-3} D_c^{-0,2} T_\infty^{-0,53} p^{0,8} W^{0,8}. \quad (4.6)$$

Здесь D_c – диаметр цилиндра, м, а давление p измеряется в бар. Компонента W в формуле (4.6) является сложной функцией геометрических и режимных параметров двигателя.

В установившемся режиме продолжительность рабочего цикла $\tau = \text{const}$. Поэтому α_w и произведение $\alpha_w T_\infty$ являются периодическими функциями времени и их можно представить в виде рядов Фурье:

$$\alpha_w(t) = \bar{\alpha}_w + \sum_{k=-\infty}^{\infty} [\alpha_{c,k} \cos(k\omega t) + \alpha_{s,k} \sin(k\omega t)], \quad (4.7)$$

$$q_w(t) \equiv \alpha_w T_\infty = \bar{q}_w + \sum_{k=1}^{\infty} [q_{c,k} \cos(k\omega t) + q_{s,k} \sin(k\omega t)], \quad (4.8)$$

где $\omega = 2\pi/\tau$ – угловая частота рабочего цикла.

Пренебрегая для простоты кривизной поверхности, можно уравнения (4.4) и (4.5) переписать в виде:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2}, \quad (4.9)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T_w}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha_w(t) T_w(t, 0) - q_w(t). \quad (4.10)$$

Пусть, наконец, L – условная толщина стенки, причем на поверхности $x = L$ происходит теплообмен с системой охлаждения, имеющей температуру T_L , т.е. справедливо уравнение

$$-\lambda \left. \frac{\partial T_w}{\partial x} \right|_{x=L} = \alpha_L (T_w(t, L) - T_L), \quad \alpha_L = \text{const}. \quad (4.11)$$

Линейность уравнения (4.9), а также граничных условий (4.10) и (4.11) позволяет записать решение задачи (4.9) – (4.11) в виде суммы

$$T(x, t) = \bar{T}(x) + \tilde{T}(x, t) + \tilde{\tilde{T}}(x, t). \quad (4.12)$$

Правая часть (4.12) включает не зависящую от времени (постоянную) составляющую $\bar{T}(x)$, свободную пульсирующую составляющую $\tilde{T}(x, t)$ и принужденную пульсирующую составляющую $\tilde{\tilde{T}}(x, t)$.

Функция $\bar{T}(x)$ является решением задачи

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{T}(x)}{dx^2} = 0, \\ \lambda \left. \frac{d\bar{T}(x)}{dx} \right|_{x=0} = \bar{\alpha}_w \bar{T}(0) - \bar{q}_w, \\ -\lambda \left. \frac{d\bar{T}(x)}{dx} \right|_{x=L} = \alpha_L (\bar{T}(L) - T_L). \end{cases} \quad (4.13)$$

Это решение имеет вид:

$$\bar{T}(x) = \frac{\lambda (\bar{\alpha}_w T_w + \alpha_L T_L) + L \bar{\alpha}_w \alpha_L T_w - x \bar{\alpha}_w \alpha_L (T_w - T_L)}{\lambda (\bar{\alpha}_w + \alpha_L) + L \bar{\alpha}_w \alpha_L}. \quad (4.14)$$

Так как $T_w > T_L$, оно является убывающей линейной функцией координаты x , т.е. расстояния от огневой поверхности цилиндра.

Пульсирующие составляющие $\tilde{T}(x, t)$ и $\tilde{\tilde{T}}(x, t)$ имеют вид рядов Фурье

$$\tilde{T}(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\tilde{T}_{c,n}(x) \cos(n\omega t) + \tilde{T}_{s,n}(x) \sin(n\omega t) \right], \quad (4.15)$$

$$\tilde{\tilde{T}}(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\tilde{\tilde{T}}_{c,n}(x) \cos(n\omega t) + \tilde{\tilde{T}}_{s,n}(x) \sin(n\omega t) \right], \quad (4.16)$$

которые уже не содержат постоянных членов. Применяя метод разделения переменных, для определения коэффициентов ряда (4.15) получаем для всех $n \geq 1$ системы уравнений:

$$\rho c_v n \omega \tilde{T}_{s,n}(x) = \lambda \frac{d^2 \tilde{T}_{c,n}(x)}{dx^2}, \quad (4.17)$$

$$\lambda \left. \frac{d\tilde{T}_{c,n}(x)}{dx} \right|_{x=0} = \bar{\alpha}_W \tilde{T}_{c,n}(0) + \alpha_{c,n} \bar{T}(0), \quad (4.18)$$

$$-\lambda \left. \frac{d\tilde{T}_{c,n}(x)}{dx} \right|_{x=L} = \alpha_L \tilde{T}_{c,n}(L), \quad (4.19)$$

$$-\rho c_v n \omega \tilde{T}_{c,n}(x) = \lambda \frac{d^2 \tilde{T}_{s,n}(x)}{dx^2}, \quad (4.20)$$

$$\lambda \left. \frac{d\tilde{T}_{s,n}(x)}{dx} \right|_{x=0} = \bar{\alpha}_W \tilde{T}_{s,n}(0) + \alpha_{s,n} \bar{T}(0), \quad (4.21)$$

$$-\lambda \left. \frac{d\tilde{T}_{s,n}(x)}{dx} \right|_{x=L} = \alpha_L \tilde{T}_{s,n}(L). \quad (4.22)$$

Используя пакеты программ символьной математики, такие как “Wolfram Mathematica” или “Maple”, можно получить аналитическое решение системы уравнений (4.17)–(4.22). Не выписывая самого решения из-за его громоздкости, приведем основной результат анализа: функции $\tilde{T}_{c,n}(x)$ и $\tilde{T}_{s,n}(x)$ экспоненциально убывают по направлению от огневого ограждения цилиндра, так как они пропорциональны выражению

$$A(x) = \exp \left(-x \sqrt{\frac{n \omega \rho c_v}{2\lambda}} \right) \quad (4.23)$$

Коэффициенты Фурье разложения (4.16) удовлетворяют уравнениям:

$$\rho c_v n \omega \tilde{\tilde{T}}_{s,n}(x) = \lambda \frac{d^2 \tilde{\tilde{T}}_{c,n}(x)}{dx^2}, \quad (4.24)$$

$$\lambda \left. \frac{d \tilde{\tilde{T}}_{c,n}(x)}{dx} \right|_{x=0} = -q_{c,n}, \quad (4.25)$$

$$-\lambda \left. \frac{d \tilde{\tilde{T}}_{c,n}(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0, \quad (4.26)$$

$$-\rho c_v n \omega \tilde{\tilde{T}}_{c,n}(x) = \lambda \frac{d^2 \tilde{\tilde{T}}_{s,n}(x)}{dx^2}, \quad (4.27)$$

$$\lambda \left. \frac{d \tilde{\tilde{T}}_{s,n}(x)}{dx} \right|_{x=0} = -q_{s,n}, \quad (4.28)$$

$$-\lambda \left. \frac{d \tilde{\tilde{T}}_{s,n}(x)}{dx} \right|_{x=L} = 0. \quad (4.29)$$

Решение системы уравнений (4.24)–(4.29), выполненное средствами пакета символьной математики “Wolfram Mathematica”, также обнаруживает экспоненциальное убывание по закону, описываемому соотношением (4.23).

Приведенный анализ показывает, что при распространении тепла в элементах огневого ограждения цилиндра (головка цилиндра, поршень, гильза цилиндра) наблюдается термический «скин-эффект»: пульсации температуры практически сосредоточены в тонком слое материала ограждения. По данным работы [34] глубина проникновения температурных пульсаций составляет: для алюминиевых элементов конструкции цилиндра ~0,5 мм, для стальных элементов конструкции ~0,3 мм. Для керамических деталей свечи зажигания она составляет ~0,15 мм. Поэтому при расчете термических процессов в камере сгорания ДВС с достаточной для практики точностью можно считать, что температура поверхностей огневого ограждения цилиндра при установившемся режиме работы ДВС не зависит от угла поворота коленчатого вала, т.е. прини-

мается постоянной. Однако вычисление этой температуры требует решения уравнений теплопроводности (4.3) или (4.4) с учетом пульсаций температуры рабочего тела в цилиндре ДВС и режимов работы системы охлаждения.

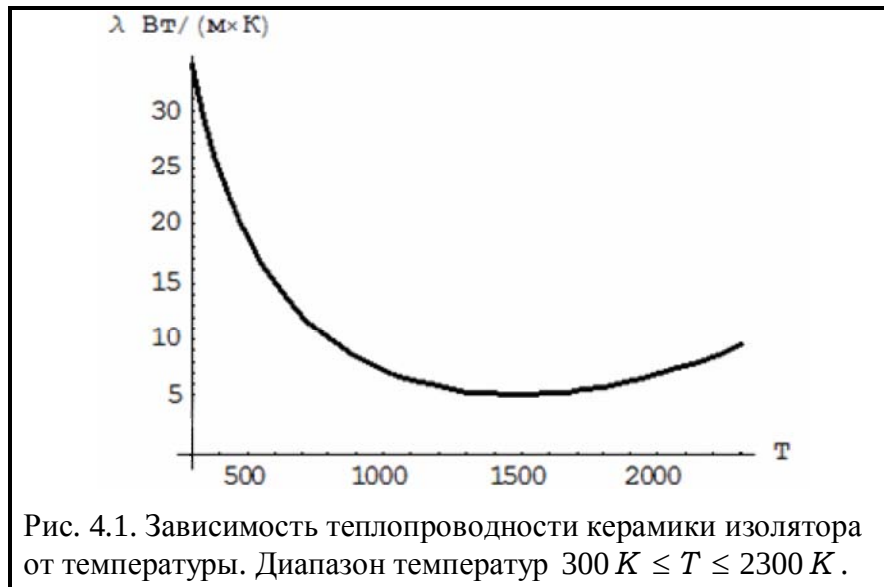
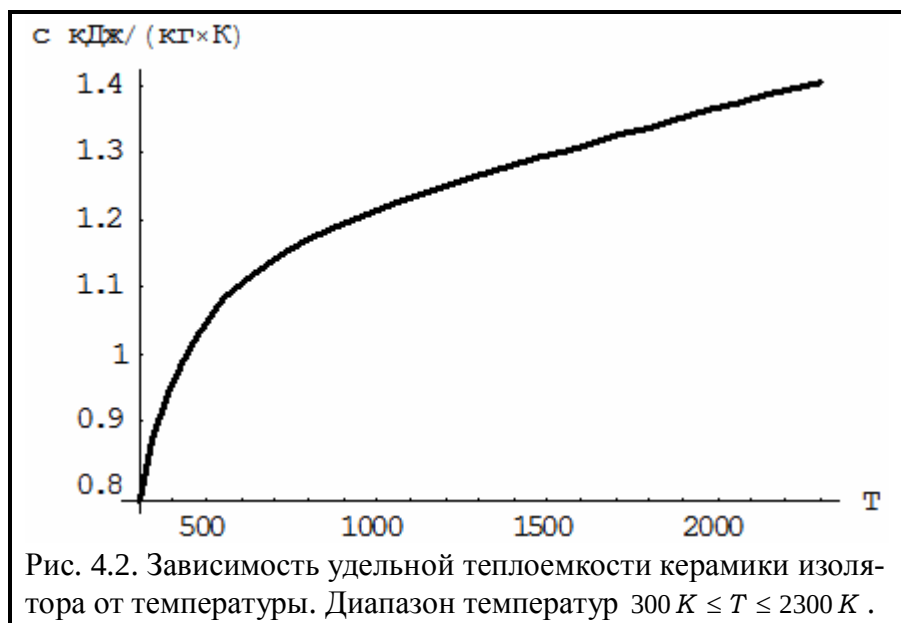


Рис. 4.1. Зависимость теплопроводности керамики изолятора от температуры. Диапазон температур $300\text{ K} \leq T \leq 2300\text{ K}$.

В отличие от расчета температурного поля металлических элементов конструкции цилиндра ДВС, где можно считать теплофизические параметры материала постоянными, при расчете температурного поля свечи пренебрегать зависимостью теплоемкости и коэффициента теплопроводности ее керамических деталей от температуры T уже нельзя. Так, зависимость теплопроводности и удельной теплоемкости корундовой керамики от температуры дается выражениями [16]

$$\lambda(T) = \frac{1,063 \cdot 10^4}{T} + 0,420 - 8,08 \cdot 10^{-3}T + 4,35 \cdot 10^{-6}T^2 \quad \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), \quad (4.30)$$

$$c(T) = -\frac{0,345 \cdot 10^5}{T^2} + 1,123 + 0,126 \cdot 10^{-3}T \quad \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \quad (4.31)$$



Графики этих функций приведены на рис. 4.1 и рис 4.2. Характерной особенностью функции $\lambda(T)$ является минимум при температуре $T \approx 1500\text{ K}$. Наличие этого минимума обеспечивает стабильность температуры теплового конуса свечи при колебаниях температуры рабочего тела T_∞ . Дальнейшее обсуждение свойств температурного поля свечи будет проведено в п. 4.3.

4.2. Математическое моделирование рабочего цикла ДВС

При разработке алгоритма численного моделирования тепловых процессов в цилиндре ДВС основное внимание следует уделить двум из них: процессу сжатия и процессу сгорания – расширения, которые характеризуются наибольшими скоростями изменения температуры, давления и теплофизических параметров рабочего тела. Как показывает опыт, процессы газообмена слабо влияют на термические характеристики свечи зажигания, и при моделировании температурного поля свечи зажигания ими можно пренебречь.

При анализе процесса сжатия основываются на уравнении баланса энергии в цилиндре ДВС, которое записывают в виде

$$M_a C_{vu} \frac{dT_u}{d\varphi^\circ} + p \frac{dV}{d\varphi^\circ} + \frac{1}{6n} \alpha_w \sum_{i=1}^3 F_i (T_u - T_{w,i}) = 0. \quad (4.32)$$

В этом уравнении используются следующие обозначения:

φ° , градусов – угол поворота коленчатого вала;

индекс "u" (от английского "unburned") относится к несгоревшей смеси;

$T_u = T_u(\varphi^\circ)$, градусов Кельвина – мгновенное значение температуры несгоревшей (свежей) бензовоздушной смеси;

$p = p(\varphi^\circ)$, мегапаскалей (МПа) – мгновенное значение давления в цилиндре;

$V = V(\varphi^\circ)$, м³ – мгновенное значение объема цилиндра;

n , мин⁻¹ – частота вращения коленчатого вала;

M_a , киломоль (кмоль) – количество рабочего тела в цилиндре;

$C_{vu} = C_{vu}(T_u)$, кДж/(кмоль·К) – теплоемкость рабочего тела при постоянном объеме;

T_{wi} , градусов Кельвина – средняя температура i – го участка огневого ограждения цилиндра (головка блока, гильза цилиндра, огневая поверхность поршня);

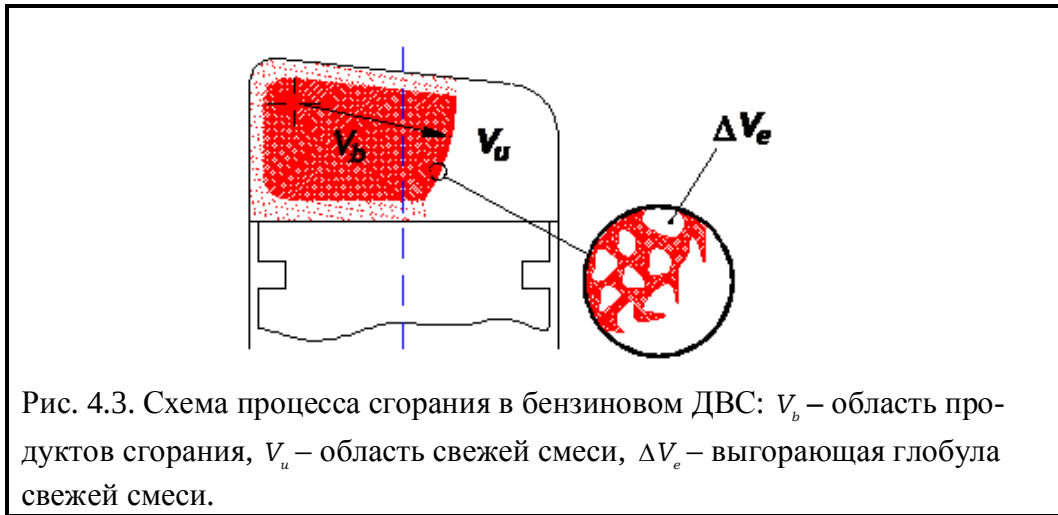
F_i , м² – площадь i – го участка огневого ограждения цилиндра.

Мгновенные значения объема цилиндра и площади его частей рассматриваются, как заданные функции φ° , теплоемкость C_{vu} является заданной функцией температуры, $M_a = \text{const}$, $T_{wi} = \text{const}$. Зависимость коэффициента теплообмена α_w от параметров процесса описывается формулой (4.6). Таким образом, уравнение (4.32) содержит 2 неизвестные функции p и T_u . Для того, чтобы доопределить задачу используется дифференциальная форма уравнения состояния Клайперона – Менделеева

$$\frac{dT_u}{d\varphi^\circ} = \frac{1}{M_a R_\mu} \left(V \frac{dp}{d\varphi^\circ} + p \frac{dV}{d\varphi^\circ} \right), \quad (4.33)$$

в котором R_μ – универсальная газовая постоянная.

Простейшая модель **процесса сгорания** в бензиновых двигателях предусматривает разбиение рабочего тела на три зоны (см. рис. 4.3):



- зону несгоревшей (unburned) части заряда, содержащей M_u киломолей смеси, состоящей из воздуха, остаточных газов и паров топлива, занимающей объем V_u и имеющей температуру T_u ;
- зону сгоревшей (burned) части заряда, содержащей M_b киломолей продуктов сгорания, занимающей объем V_b и имеющей температуру T_b ;
- зону фронта пламени, характеризующую адиабатической температурой сгорания T_{fad} и объемом $\Delta_f S_f$, где Δ_f – глубина зоны пламени, а S_f – ее площадь.

Мгновенное значение давления газовой смеси $p(\varphi^\circ)$ во всех зонах принимается одинаковым.

Если к некоторому моменту времени t выгорела x – ая часть заряда, то M_u определяется равенством:

$$M_u = (1 - x) M_a. \quad (4.34)$$

Уравнение состояния газовой смеси, образующей несгоревшую часть заряда, имеет вид:

$$pV_u = (1 - x) M_a R_u T_u. \quad (4.35)$$

Выполнив логарифмическое дифференцирование по углу φ° поворота коленчатого вала, этому уравнению можно придать вид:

$$p^{-1} \frac{dp}{d\varphi^\circ} + V_u^{-1} \frac{dV_u}{d\varphi^\circ} = T_u^{-1} \frac{dT_u}{d\varphi^\circ} - (1 - x)^{-1} \frac{dx}{d\varphi^\circ}. \quad (4.36)$$

Аналогично, количество киломолей M_b продуктов сгорания определяется соотношением:

$$xM_b = x\mu_0 M_a \quad (4.37)$$

где μ_0 – коэффициент молекулярного изменения рабочего тела при сгорании.

Уравнение состояния газовой смеси в зоне сгоревшей части заряда имеет вид:

$$pV_b = xM_b R_\mu T_b. \quad (4.38)$$

Дифференциальная форма этого уравнения имеет вид:

$$p^{-1} \frac{dp}{d\varphi^\circ} + V_b^{-1} \frac{dV_b}{d\varphi^\circ} = x^{-1} \frac{dx}{d\varphi^\circ} + T_b^{-1} \frac{dT_b}{d\varphi^\circ} + M_b^{-1} \frac{dM_b}{d\varphi^\circ}. \quad (4.39)$$

Коэффициент молекулярного изменения рабочего тела при сгорании с учетом присутствия в несгоревшей смеси остаточных газов можно записать в виде:

$$\mu_0 = \frac{M_b}{M_a} = \begin{cases} \frac{0.21(1-\alpha)L_0 + g_H/4 - 1/m_F + \gamma_r}{(\alpha L_0 + 1/m_F)(1 + \gamma_r)}, & \text{если } \alpha < 1, \\ \frac{\alpha L_0 + g_H/4 + \gamma_r}{(\alpha L_0 + 1/m_F)(1 + \gamma_r)}, & \text{если } \alpha \geq 1. \end{cases} \quad (4.40)$$

Здесь m_F – молярная масса топлива, кмоль.

В уравнении (4.40) использованы следующие обозначения:

L_0 – количество воздуха, необходимое для совершенного полного сгорания

1 кг жидкого топлива, кмоль/кг,

α – коэффициент избытка воздуха,

g_H – количество кг водорода в 1 кг топлива,

m_F – молярная масса топлива, кг/кмоль,

γ – коэффициент остаточных газов.

Для бензина стандартного состава: $g_H = 0.145$ кг, $m_F = 114$ кг/кмоль, а баланс-ная формула бензина имеет вид C_8H_{18} .

В течение процесса сгорания при повороте коленчатого вала на угол $d\varphi^\circ$ количество киломолей газобензиновой смеси в зоне несгоревшей части заряда

изменяется на величину $d[(1-x(\varphi^\circ))M_a] = -M_a dx(\varphi^\circ)$, изменяя энтальпию этой зоны на $-M_a H_u(T_u) dx(\varphi^\circ)$. Поэтому уравнение баланса мощности в этой зоне принимает вид:

$$-H_u(T_u)M_a \frac{dx}{d\varphi^\circ} = \frac{d}{d\varphi^\circ} [M_a (1-x)U_u(T_u)] + p \frac{dV_u}{d\varphi^\circ} + \frac{\delta Q_{w,u}}{d\varphi^\circ} = 0,$$

где $\delta Q_{w,u}$ – элементарное количество тепла, потерянное (полученное) рассматриваемой зоной от огневого ограждения цилиндра.

Выполнив элементарные выкладки, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$M_a \left[(1-x(\varphi^\circ))C_{v,u}(T_u(\varphi^\circ)) \frac{dT_u(\varphi^\circ)}{d\varphi^\circ} + R_u T_u(\varphi^\circ) \frac{dx(\varphi^\circ)}{d\varphi^\circ} \right] + \\ + p T_u(\varphi^\circ) \frac{dV_u(\varphi^\circ)}{d\varphi^\circ} + \frac{\delta Q_{w,u}(T_u, \varphi^\circ)}{d\varphi^\circ} = 0. \quad (4.41)$$

Элементарная порция $M_a dx(\varphi^\circ)$ несгоревшей смеси, попав в зону пламени, адиабатически сгорает, превращаясь в $M_b dx(\varphi^\circ)$ киломолей продуктов сгорания. Время ее сгорания δt удовлетворяет условию $\delta t \ll (6n)^{-1} d\varphi^\circ$, вследствие чего сгорание можно рассматривать, как мгновенное. Адиабатическую температуру пламени T_{fl}^{ad} можно определить из условия баланса энтальпии, решив уравнение

$$C_{v,u}(T_u) \frac{dT_u}{d\varphi^\circ} - \mu_0 C_{p,b}(T_{fl}^{ad}) \frac{dT_{fl}^{ad}}{d\varphi^\circ} = 0. \quad (4.42)$$

Уравнение баланса мощности в зоне продуктов сгорания принимает вид:

$$H_b(T_{fl}^{ad}) \frac{d}{d\varphi^\circ} [M_b x(\varphi^\circ)] = \frac{d}{d\varphi^\circ} [M_b x(\varphi^\circ) U_b(T_b)] + \\ + p \frac{dV_b(\varphi^\circ)}{d\varphi^\circ} + \frac{\delta Q_{w,b}}{d\varphi^\circ}. \quad (4.43)$$

В классических схемах сгорания бензовоздушной смеси полагают, что при горении стехиометрической смеси получаются только молекулы H_2O и CO_2 (т.н. совершенное полное сгорание). Более того, полагают, что и при сгорании не-

стехиометрических бензовоздушных смесей коэффициент молекулярного изменения не зависит от времени (т.е. от угла φ°), а зависит только от коэффициента избытка воздуха α . В этом случае, выполнив необходимые преобразования, можно переписать уравнение (4.43) в следующей форме:

$$M_b x C_{v,b}(T_b) \frac{dT_b}{d\varphi^\circ} + p \frac{dV_b}{d\varphi^\circ} + M_b [U_b(T_b) - H_b(T_{fl}^{ad})] \frac{dx}{d\varphi^\circ} + \frac{\delta Q_{w,b}}{d\varphi^\circ} = 0. \quad (4.44)$$

Для замыкания системы уравнений, приведенных выше, используются уравнение выгорания топливовоздушной смеси, предложенное проф. Вибе [12]. Это уравнение имеет вид:

$$\frac{dx}{d\varphi^\circ} = 6.908 \frac{m+1}{\varphi_z^\circ} \left(\frac{\varphi^\circ + \theta^\circ}{\varphi_z^\circ} \right)^m (1-x), \quad (4.45)$$

где φ_z° – продолжительность сгорания, измеряемая в градусах поворота коленчатого вала (ПКВ), θ° – угол опережения зажигания, градус ПКВ, а m – т.н. показатель сгорания.

Теплообмен $\delta Q_{w,u}/d\varphi^\circ$ и $\delta Q_{w,b}/d\varphi^\circ$ между зонами рабочего тела и элементами огневого ограждения цилиндра описывается уравнениями

$$\frac{\delta Q_{w,u}}{d\varphi^\circ} = \alpha_w \sum_{i=1}^3 F_{i,u} (T_u - T_{w,i}), \quad (4.46)$$

$$\frac{\delta Q_{w,b}}{d\varphi^\circ} = \alpha_w \sum_{i=1}^3 F_{i,b} (T_u - T_{w,i}). \quad (4.47)$$

В этих уравнениях коэффициент теплообмена α_w вычисляется по формуле Вошни (4.6), а функции $F_{i,u}(\varphi^\circ)$ и $F_{i,b}(\varphi^\circ)$ означают площади i -го элемента огневого ограждения цилиндра, омываемые соответственно свежей смесью и продуктами сгорания.

По результатам численного моделирования рабочего цикла рассматриваемого ДВС вычисляются следующие величины:

1. среднее индикаторное давление цикла p_i ;
2. аппроксимация тригонометрическим полиномом степени N , т.е. выражением

$$T_{\infty}(\varphi^{\circ}) = \bar{T}_{\infty} + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(n\varphi^{\circ}) + b_n \sin(n\varphi^{\circ})] \quad (4.48)$$

температуры рабочего тела в окрестности свечи зажигания;

3. аппроксимация тригонометрическим полиномом степени N теплового потока

$$q_w(\varphi^{\circ}) = \bar{q}_w + \sum [c_n \cos(n\varphi^{\circ}) + d_n \sin(n\varphi^{\circ})]. \quad (4.49)$$

Коэффициенты рядов (4.48) и (4.49) записываются в виде таблиц, пригодных для последующего использования программами численного моделирования температурного поля свечи зажигания.

4.3. Математическая модель температурного поля свечи

Математической моделью температурного поля металлических элементов конструкции свечи зажигания, теплофизические параметры которых не зависят (в принятом приближении) от температуры, является уравнение (4.4). С другой стороны, пренебрежение зависимостью теплофизических параметров ее керамических деталей от температуры не допустимо. Поэтому при расчете распределения температур в тепловом конусе и других керамических элементах свечи необходимо использовать уравнение (4.3). Для наших целей это уравнение целесообразно, используя известные соотношения векторного анализа [14]

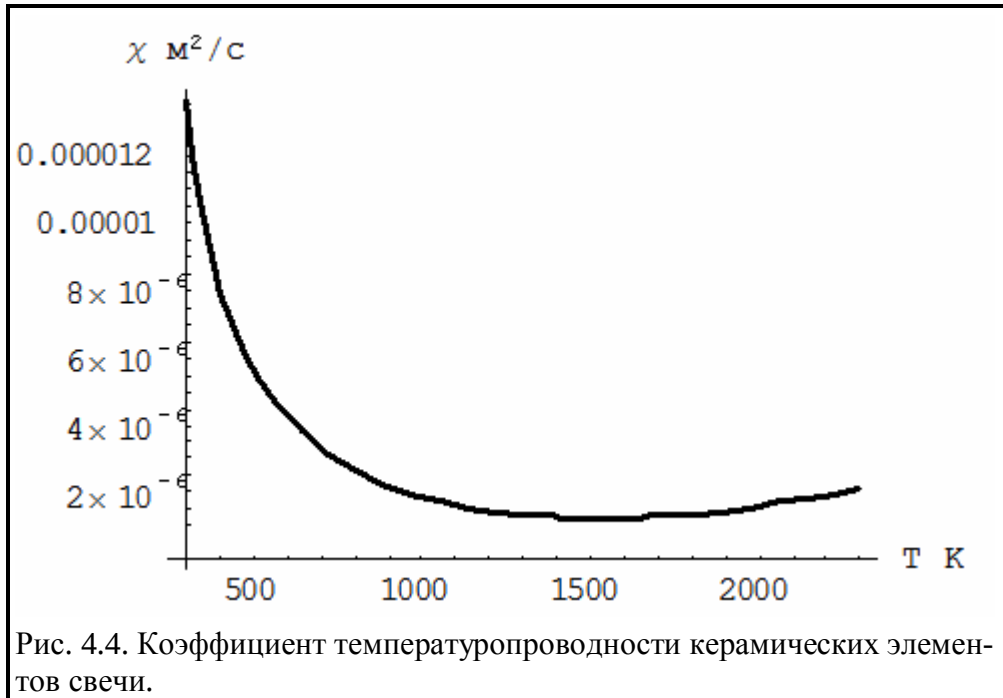
$\operatorname{div}(\varphi \mathbf{a}) = \varphi \operatorname{div} \mathbf{a} + \mathbf{a} \cdot \operatorname{grad} \varphi$ и $\operatorname{grad} \varphi(f) = (d\varphi/df) \operatorname{grad} f$, где $\mathbf{a}$ – векторное поле, а φ и f – скалярные поля, преобразовать к виду

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\chi \operatorname{grad} T) + \chi \frac{d \ln(\rho c)}{dT} (\operatorname{grad} T)^2. \quad (4.50)$$

В уравнении (4.50) введена функция $\chi(T) = \lambda(T)/(\rho(T)c(T))$, называемая коэффициентом *температуропроводности*. Подставляя в это выражение правые части соотношений (4.30) и (4.31), а также полагая $\rho = 3200 \text{ кг/м}^3$ (плотность боркорунда), получаем

$$\chi(T) = \frac{26,364T + 10,424 \cdot 10^{-3} T^2 - 20,028 \cdot 10^{-6} T^3 + 10,789 \cdot 10^{-9} T^4}{-2,738 \cdot 10^8 + 1,819 \cdot 10^{-10} T + 8,913 \cdot 10^3 T^2 + T^3}. \quad (4.51)$$

График этой функции приведен на рис. 4.4.

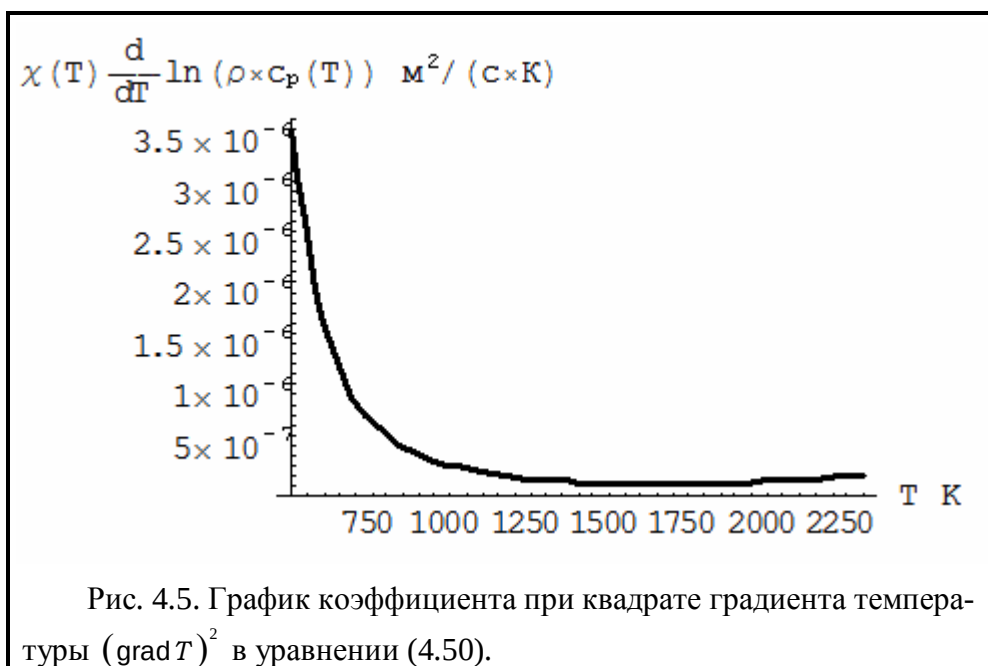


Функция $\psi(T) = \chi(T) \left[d \ln(\rho c_p) / dT \right]$ записывается в виде:

$$\psi(T) = \frac{2,292 \cdot 10^5 + 9,063T - 0,1741T^2 + 5,124 \cdot 10^{-4}T^3}{(3,45 \cdot 10^4 - 1,123T - 1,26 \cdot 10^{-4}T^2)^2} +$$

$$+ 10^{-8}T^4 \frac{1,655 - 3,18 \cdot 10^{-2}T + 1,713 \cdot 10^{-3}T^2}{(3,45 \cdot 10^4 - 1,123T - 1,26 \cdot 10^{-4}T^2)^2}. \quad (4.52)$$

График этой функции приведен на рис. 4.5.



Наряду с теплофизическими свойствами керамики, для расчета температурного поля свечи нам понадобятся теплофизические свойства металлических деталей ее конструкции, а также теплофизические свойства воздуха и продуктов сгорания. Эти величины приведены в таблице 4.1.

Вещество	Таблица 4.1			
	ρ кг/м ³	c Дж/(кг·К)	λ Вт/(м·К)	χ м ² /(с·К)
Серебро	$1,049 \cdot 10^4$	$2,328 \cdot 10^2$	$4,186 \cdot 10^2$	$1,71 \cdot 10^{-4}$
Медь	$8,94 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^2$	$2,931 \cdot 10^2$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
Алюминий	$2,70 \cdot 10^3$	$8,625 \cdot 10^2$	$2,009 \cdot 10^2$	$8,60 \cdot 10^{-5}$
Платина	$2,146 \cdot 10^4$	$1,319 \cdot 10^2$	$0,712 \cdot 10^2$	$2,50 \cdot 10^{-5}$
Сталь Ст.10	$7,85 \cdot 10^3$	$4,940 \cdot 10^2$	$0,461 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
Чугун	$7,4 \cdot 10^3$	$5,694 \cdot 10^2$	$0,502 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^{-5}$

Теплоемкость воздуха при постоянном давлении в диапазоне значений температур $273\text{K} < T \leq 900\text{K}$ определяется по формуле [13]

$$c_p = 1005 + 0,0963T, \quad (4.53)$$

а его теплопроводность в указанном диапазоне температур и теплопроводность продуктов сгорания в диапазоне $900\text{K} < T \leq 1800\text{K}$ – по формуле

$$\lambda = 3,61 \cdot 10^{-4} T^{0,75}. \quad (4.54)$$

Теплоемкость продуктов сгорания в диапазоне $900\text{K} < T \leq 1800\text{K}$ определяют по формуле

$$c_p = 837,4 + 0,0762T. \quad (4.55)$$

Схематическое изображение геометрии свечи зажигания, используемое при расчете ее температурного поля, приведено на рис. 4.6.

Существенной особенностью рассматриваемой геометрической модели является то, что в нее включена прилегающая к свече часть головки цилиндра. Не трудно убедиться, что температурное поле свечи в соответствии с приведенной схемой описывается следующими уравнениями:

◆ контактная головка

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \chi_1 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_1; \quad (4.56)$$

◆ стеклогерметик

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \chi_2 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_2; \quad (4.57)$$

◆ изолятор

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \operatorname{div}(\chi_3(T_3) \operatorname{grad} T_3) + \chi_3(T_3) \frac{d \ln(\rho_3 c_3(T_3))}{dT_3} (\operatorname{grad} T_3)^2; \quad (4.58)$$

◆ центральный электрод

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = \chi_4 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_4; \quad (4.59)$$

◆ корпус свечи

$$\frac{\partial T_5}{\partial t} = \chi_5 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_5; \quad (4.60)$$

◆ теплоотводящая шайба

$$\frac{\partial T_6}{\partial t} = \chi_6 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_6; \quad (4.61)$$

◆ уплотнительное кольцо

$$\frac{\partial T_7}{\partial t} = \chi_7 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_7; \quad (4.62)$$

◆ головка цилиндра

$$\frac{\partial T_8}{\partial t} = \chi_8 \operatorname{div} \operatorname{grad} T_8. \quad (4.63)$$

Для расчета температурного поля свечи уравнения (4.56) – (4.63) необходимо дополнить граничными условиями. Эти условия удобно подразделить на два класса: внешние и внутренние. К *внешним граничным условиям* следует отнести:

◆ Условия на границе между геометрическими компонентами модели по схеме рис. 2.6 и рабочим телом в цилиндре ДВС. Эти граничные условия описываются уравнениями

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(t, x, y, z)}{\partial n_{i,g}} = \alpha_w(t) T_i(t, x, y, z) - q_w(t), \quad \{x, y, z\} \in S_{i,g}, \quad (4.64)$$

в которых индекс $i = 3, 4, 5, 8$, $S_{i,g}$ – граница между i – м элементом схемы рис. 2.6 и рабочим телом, $n_{i,g}$ – внешняя нормаль к этой поверхности, а функции $\alpha_w(t)$ и $q_w(t)$ определены соотношениями (4.6) и (4.8) соответственно.

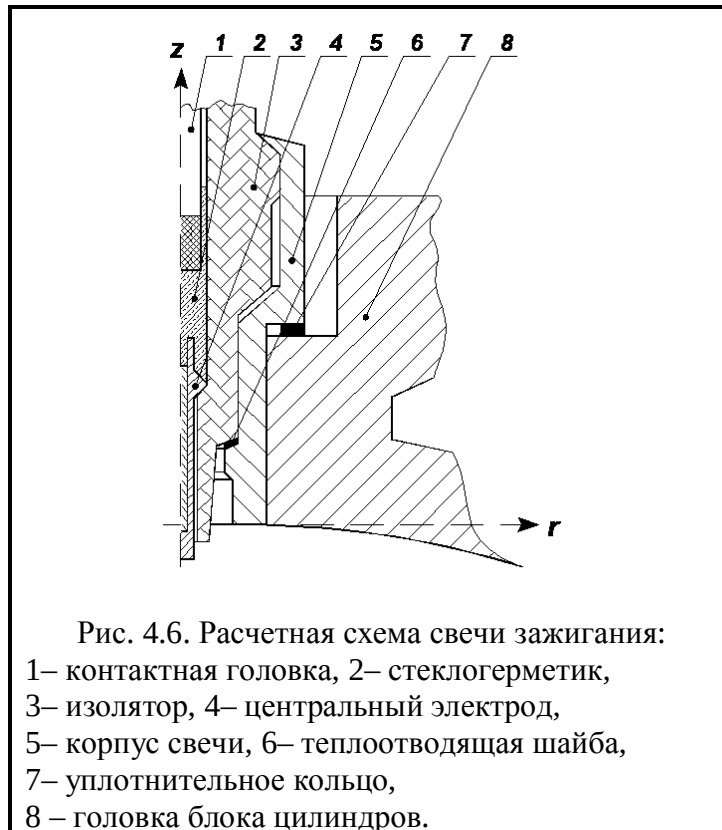
♦ Условия на границе $S_{8,alt}$ выделенной части головки цилиндра ($i = 8$) с ее отброшенной частью, обозначенной индексом “alt”, которые записываются в предположении, что теплообмена между этими частями головки блока не происходит. Они имеют вид:

$$\frac{\partial T_8(t, x, y, z)}{\partial n_{8,alt}} = 0, \quad \{x, y, z\} \in S_{8,alt}. \quad (4.65)$$

♦ Условия теплообмена на границе $S_{8,clد}$ между выделенной частью головки цилиндра и системой охлаждения, которые записываются в виде

$$\lambda_8 \frac{\partial T_8(t, x, y, z)}{\partial n_{8,clد}} = \alpha_{clد} (T_8(t, x, y, z) - T_{clد}), \quad \{x, y, z\} \in S_{8,clد}, \quad (4.66)$$

где $T_{clد}$ – температура охлаждающей жидкости, а формулы для вычисления коэффициента теплообмена $\alpha_{clد}$ между головкой цилиндра и охлаждающей жидкостью приводятся в курсах проектирования ДВС.



Опыт показывает, что теплообменом между элементами конструкции свечи и воздухом в подкапотном пространстве ДВС можно пренебречь. Поэтому на границах $S_{i,\text{air}}$, $i = 1, 3, 5, 8$ этих элементов с воздухом можно положить

$$\frac{\partial T_i}{\partial n_{i,\text{air}}} = 0. \quad (4.67)$$

К *внутренним граничным условиям* относятся условия, описывающие теплообмен между находящимися в тепловом контакте элементами конструкции свечи. Для описания контактного теплообмена между i -м и j -м элементами конструкции используется система уравнений

$$\begin{cases} \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n_{i,j}} = \alpha_{i,j} (T_i - T_j), \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n_{i,j}} + \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial n_{i,j}} = 0. \end{cases} \quad (4.68)$$

Здесь $\partial/\partial n_{i,j}$ – производная по внешней нормали к поверхности i -го элемента конструкции, а $\alpha_{i,j}$ – коэффициент теплообмена между i -м и j -м элементами. Значение этого коэффициента зависит от геометрии и микрогеометрии поверхностей контактирующих деталей, контактных напряжений и ряда других факторов. Методы определения числовых значений этих коэффициентов описаны в специальной литературе, например в монографии Попова [24].

4.4. Алгоритм расчета тепловых характеристик свечи

Как было описано в разделе 2.1, расчет тепловых характеристик свечи зажигания состоит из трех этапов, использующих различные по своему назначению программные средства.

На первом этапе работы задаемся перечнем нагрузочных и скоростных установившихся режимов работы двигателя и для каждого из этих режимов выполняется моделирование рабочего цикла. По результатам моделирования

формируется массив исходных данных для расчета температурного поля свечи зажигания, включающий:

1. Частоту вращения коленчатого вала ДВС n , угол опережения зажигания θ , коэффициент избытка воздуха α , продолжительность сгорания φ_z , показатель сгорания по Вибе m , среднее индикаторное давление p_{ind} .
2. Таблицу зависимости температуры рабочего тела T_∞ в окрестности свечи зажигания от угла поворота коленчатого вала.
3. Таблицу гармонических составляющих $a_{w,n}$, $b_{w,n}$, $n = 0, 1, \dots, N$ коэффициента теплопередачи α_w между рабочим телом и огневым ограждением цилиндра (коэффициент Вошни).
4. Таблицу гармонических составляющих $a_{q,n}$, $b_{q,n}$, $n = 0, 1, \dots, N$ плотности теплового потока $q_w = \alpha_w T_\infty$.

На втором этапе работы для каждого из выбранных режимов работы двигателя выполняется расчет температурного поля свечи. Расчет ведется с использованием известного метода конечных элементов (МКЭ). Алгоритм МКЭ описан в учебном пособии [14] и не нуждается в комментариях. Программная реализация МКЭ выполнена в таких известных программных комплексах, как “ANSYS”, “Solid Works”, “Inventor” и др. Поэтому, в отличие от стиля изложения, принятого в работе [33] и вызванного необходимостью разработки оригинальной версии программного обеспечения МКЭ [30, 31, 32], описание алгоритмов и программ МКЭ мы приводить не будем. Остановимся только на особенностях применения МКЭ к рассматриваемой задаче.

I. Расчет ведется в предположении цилиндрической симметрии задачи, пренебрегая возмущениями температурного поля свечи, вызванными влиянием бокового электрода. Таким образом, трехмерная исходная задача в координатах $\{x, y, z\}$ заменяется двумерной задачей в координатах $\{r, z\}$, где r – полярный радиус, а z – аппликата.

II. Препроцессорная обработка информации включает в себя не только триангуляцию чертежа объекта (рис. 2.6) в интерактивном режиме, традиционно выполняемую при применении МКЭ, но и вычисление коэффициентов теплообмена на внутренних границах элементов конструкции по методике В.М. Попова. При этом теплофизические свойства рабочего тела в зазорах между элементами конструкции вычисляются с использованием среднего за цикл значения температуры в цилиндре.

III. Расчет температурного поля свечи содержит две стадии, первая из которых – это определение стационарной составляющей температуры элементов конструкции из уравнений (4.56) – (4.63), в которых положено $\partial T_i / \partial t \equiv 0$, а в уравнениях (4.64) коэффициент теплообмена $\alpha_w(t)$ и плотности теплового потока $q_w(t)$ заменены их усредненными за рабочий цикл значениями $\bar{\alpha}_w$ и $\bar{q}_w$ соответственно. Вторая стадия заключается в определении пульсирующей составляющей температуры методами теории возмущений.

IV. Учитывая нелинейность уравнения (4.58), расчет температурного поля на первой стадии выполняется методом простой итерации, т.е. решается последовательность уравнений

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \left[\chi_3(T_3^{[k-1]}) \operatorname{grad} T_3^{[k]} \right] = \\ = -\chi_3(T_3^{[k-1]}) \frac{d \ln(\rho_3 c_3(T_3^{[k-1]}))}{dT_3} \left(\operatorname{grad} T_3^{[k-1]} \right)^2, \end{aligned} \quad (4.69)$$

где $[k]$ – номер итерации. В качестве начального приближения $T_3^{[0]}$ выбирается значение температуры головки цилиндра, использованное при моделировании рабочего цикла ДВС.

Третий этап работы заключается в компьютерном анализе температур узлов расчетной сетки и определении нагрузочного и скоростного режима, при котором для точек, принадлежащих тепловому конусу свечи, выполняется условие

$$T_3(r, z) \geq T_{\text{кр}}^{\text{exp}}, \quad (4.70)$$

где $T_{\text{кр}}^{\text{exp}}$ – экспериментально полученное значение температуры теплового конуса на пороге калильного зажигания.

Среднее индикаторное давление p_i , бар, соответствующее этому режиму работы двигателя, и определяет калильное число КЧ свечи зажигания рассматриваемой конструкции.

Учет изменения температурного поля свечи зажигания по времени позволяет предсказать появление калильного зажигания в зависимости от конструктивных особенностей двигателя и состава (марки) бензина. Для этого необходимо оценить скорость предпламенных реакций в окрестности теплового конуса свечи, а также количество тепла, передаваемого тепловым конусом рабочему телу на такте сжатия, после чего воспользоваться уравнением (4.1).

Глава 5. Разработка свечей зажигания

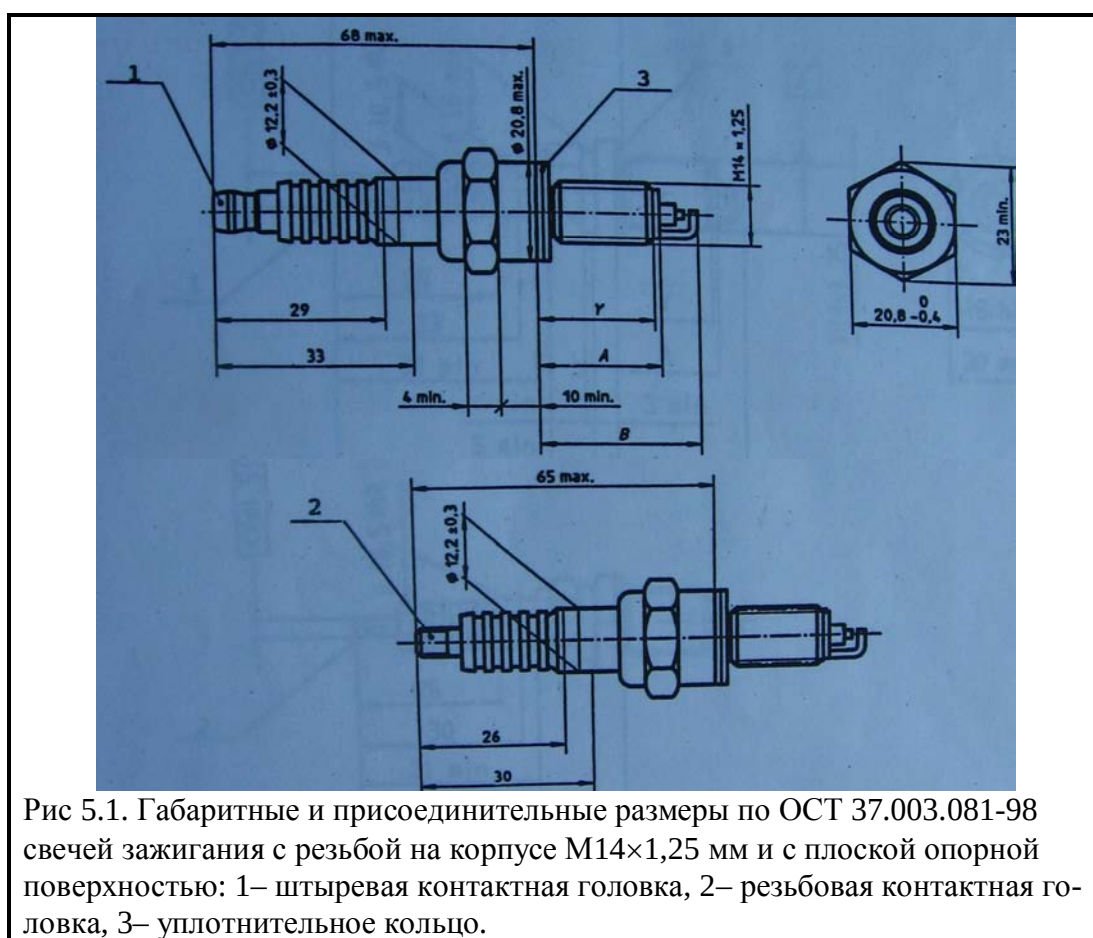
5.1. Требования стандартов и Технического регламента

В соответствии с действующими стандартами свечи зажигания относятся к классу неремонтируемых восстанавливаемых, обслуживаемых в период эксплуатации изделий. Они должны быть работоспособны при температуре окружающей среды от -45°C до $+100^{\circ}\text{C}$. На территории Российской Федерации (РФ) свечи зажигания должны изготавливаться в общеклиматическом исполнении в соответствии с требованиями ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые. Общие технические условия». Кроме того, они должны отвечать требованиям Технического регламента о безопасности колесных транспортных средств, вступающего в силу 23 сентября 2010 г. (далее – Технический регламент).

Требования к габаритным и присоединительным размерам свечей зажигания установлены ОСТ 37.003.081-98 (разработан с учетом международных стандартов) и международных стандартов ISO (Международная организация по стандартизации). В связи с этим, свечи зажигания, выпускаемые различными производителями, как отечественными, так и зарубежными, полностью взаимозаменяемы.

Исключение составляют экранированные свечи зажигания, на которых требования ОСТ 37.003.081-98 не распространяются, в связи с чем они производятся по техническим условиям (ТУ), разработанным в бывшем СССР. Эти свечи зажигания имеют оригинальные размеры и не взаимозаменяемы с экранированными свечами зажигания, производимыми в остальных странах мира, так как не соответствуют требованиям таких международных стандартов, как ISO 3412 «Транспорт дорожный. Экранированные и влагозащищенные свечи зажигания и их соединения. Типы 1а и 1в», ISO 3895 «Транспорт дорожный. Экранированная и влагозащищенная свеча зажигания и ее соединения. Тип 2», а также ISO 3896 «Транспорт дорожный. Экранированная и влагозащищенная свеча зажигания и ее соединения. Тип 3».

В соответствии с ОСТ 37.003.081-98 свечи зажигания могут иметь плоскую или коническую опорную поверхность. Для герметизации соединения с головкой блока цилиндров двигателя свечей с плоской опорной поверхностью необходимо специальное уплотнительное кольцо, а при конической посадочной поверхности уплотнительное кольцо не требуется. Размеры свечей определяются типом посадочного места в головке цилиндров ДВС, резьбой на корпусе, длиной резьбовой части корпуса и размером шестигранника под ключ. В настоящее время международными стандартами для двигателей автомобилей предусмотрено применение свечей



с резьбой M10×1,0, M12×1,25; M14×1,25 и M18×1,5 и шестигранником под ключ 16,0 мм, 19,0 мм и 20,8 мм. Ряды длин резьбовой части корпуса для свечей с плоской или конической опорной поверхностью различны. Для свечей с плоской опорной поверхностью – это 9,0 мм, 12,7 мм, 19,0 мм и 26,5 мм. Отечественным стандартом предусмотрены свечи с плоской и конической опорной поверхностью. По этому стандарту отечественная промышленность в настоя-

щее время выпускает свечи с плоской опорной поверхностью и резьбой на корпусе M14×1,25; длиной резьбовой части корпуса 9,0 мм, 12,7 мм, 19,0 мм и шестигранником под ключ 16,0 мм, 19,0 мм и 20,8 мм. Размеры наиболее распространенных свечей зажигания представлены на рис 5.1, 5.2, 5.3 и в табл. 1. Размеры свечей зажигания с конической опорной поверхностью предусмотренные ОСТ 37.003.081-98 представлены на рис 3.4. и в табл. 1.

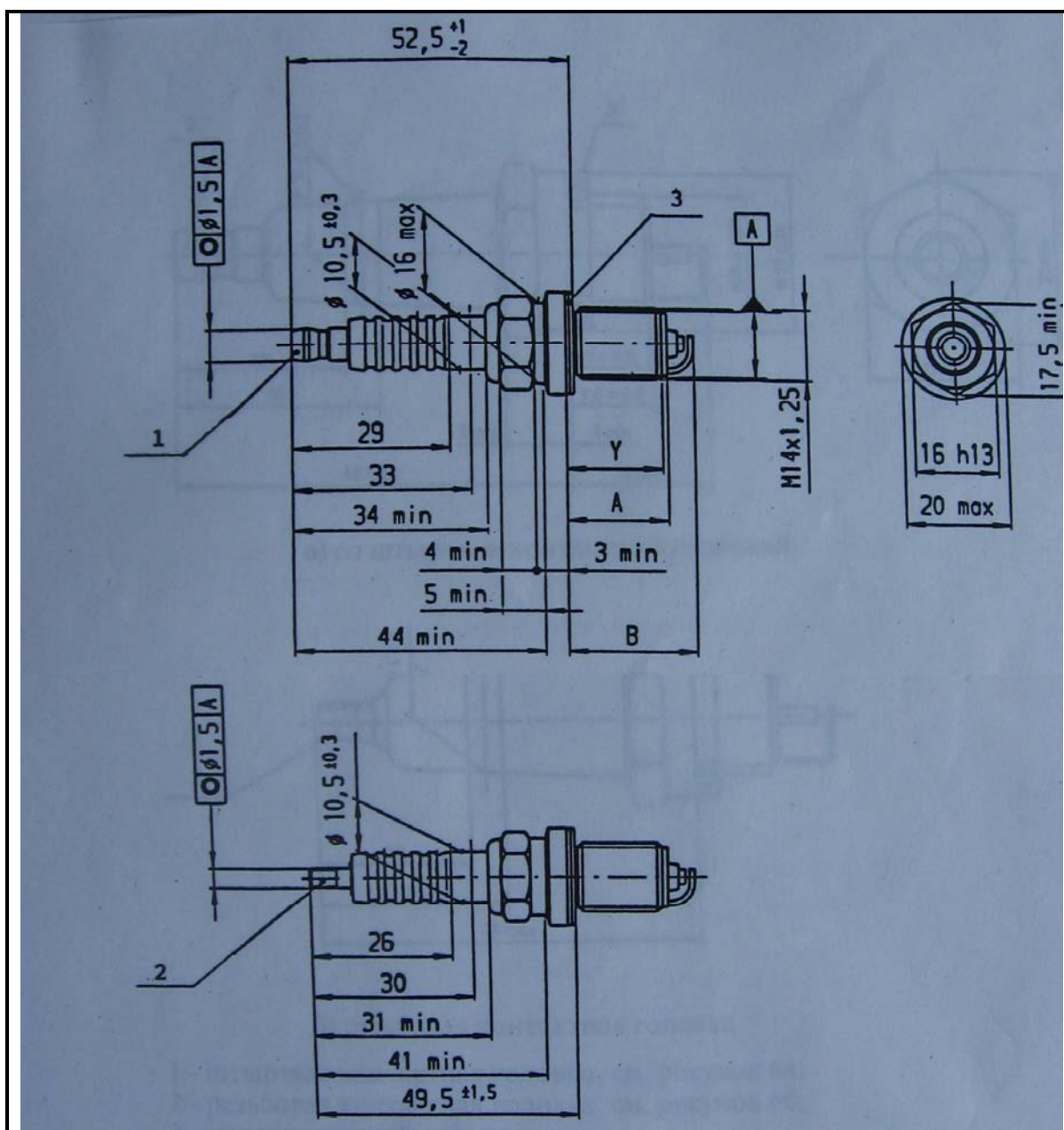
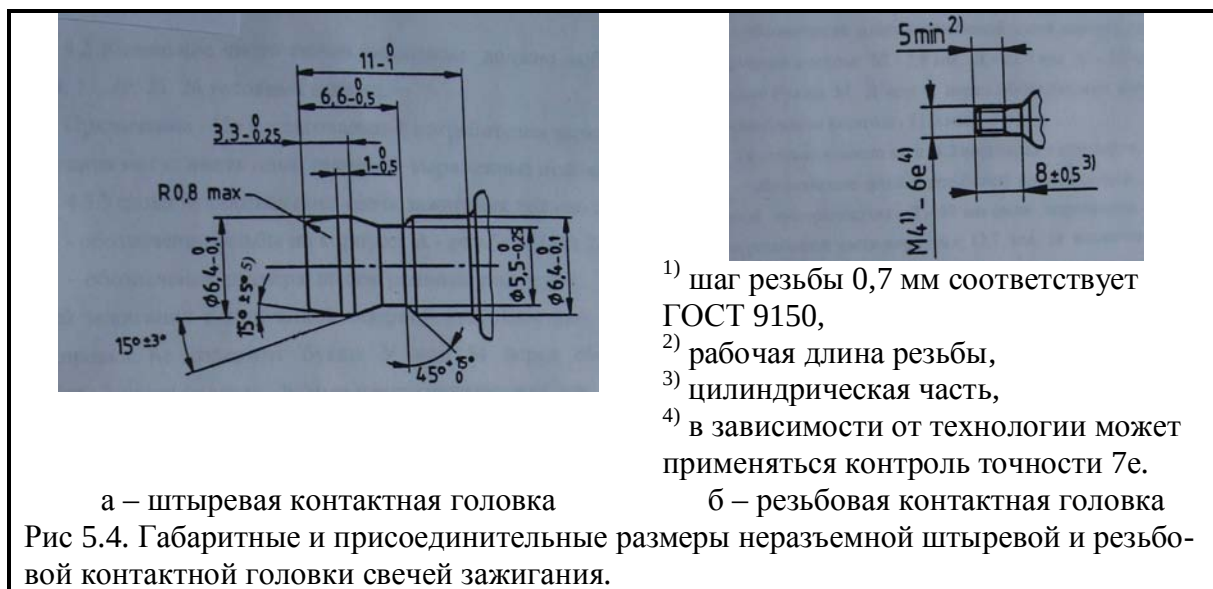


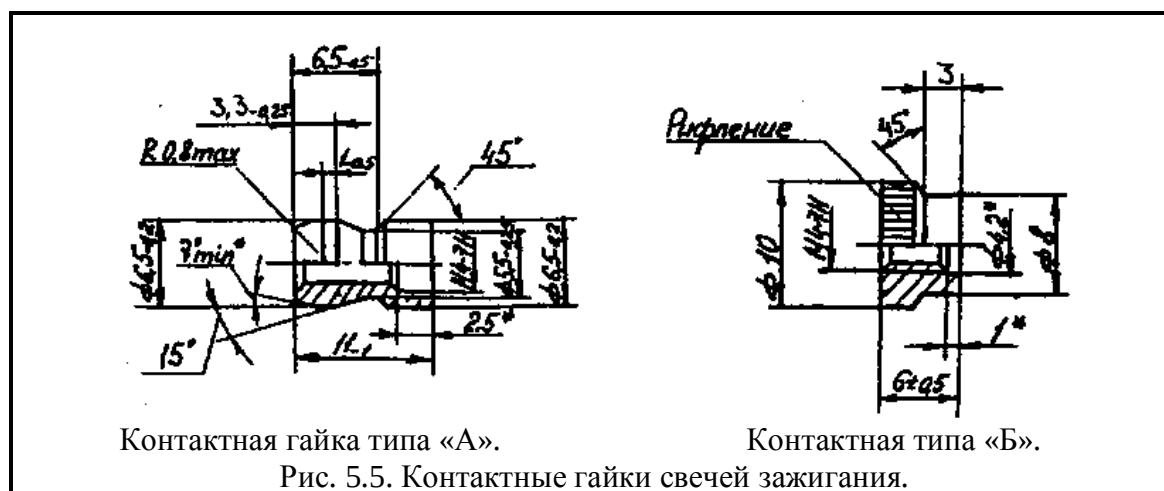
Рис 5.2. Габаритные и присоединительные размеры по ОСТ 37.003.081-98 свечей зажигания с резьбой на корпусе M14×1,25 мм, с плоской опорной поверхностью и шестигранником под ключ уменьшенным до 16 мм:

1– штыревая контактная головка, 2– резьбовая контактная головка,
3– уплотнительное кольцо.

контактную головку и съемную контактную гайку, последняя предохраняется от отвинчивания путем точечной чеканки.



Наряду с контактной гайкой, предусмотренной действующим в настоящее время ОСТ 37.003.081-98 (в более ранних редакциях стандартов на свечи зажигания она называлась «гайка типа А»), ранее применялась, и до сих пор может применяться на некоторых моделях ДВС контактная гайка типа «Б» (рис 5.5, поз. 2).



На рис. 5.6. представлены габаритные и присоединительные размеры посадочного места в головке цилиндров ДВС под свечу зажигания с резьбой на корпусе М14х1,25 мм и с плоской опорной поверхностью.

На рис. 5.7. представлены габаритные и присоединительные размеры

посадочного места в головке цилиндров ДВС под свечу зажигания с резьбой на корпусе M14x1,25 мм и с конической опорной поверхностью.

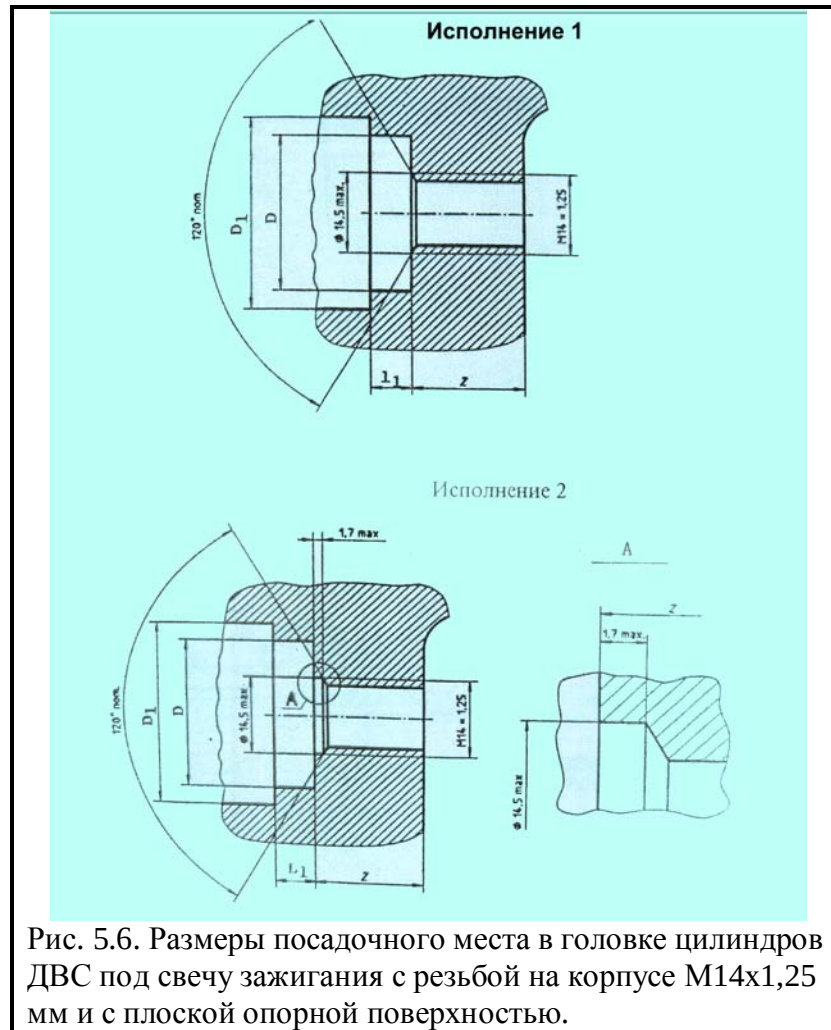


Рис. 5.6. Размеры посадочного места в головке цилиндров ДВС под свечу зажигания с резьбой на корпусе M14x1,25 мм и с плоской опорной поверхностью.

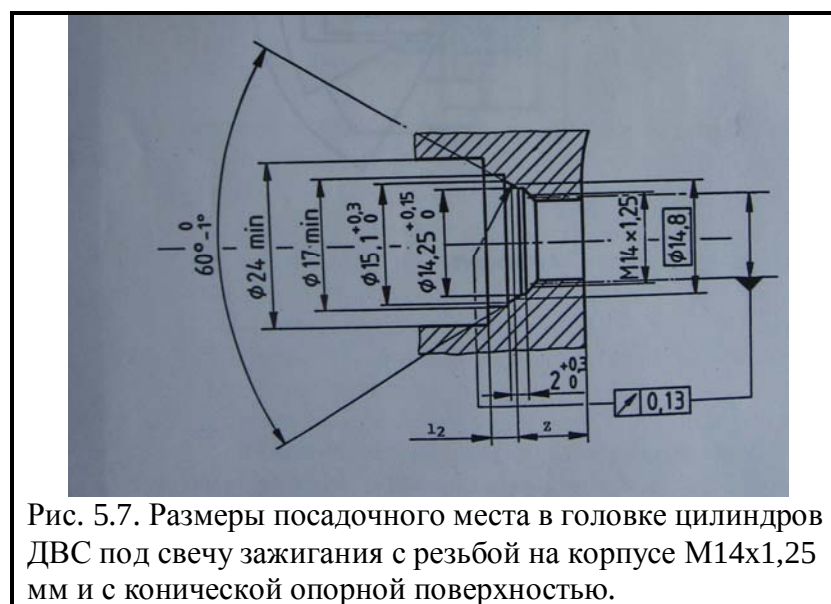


Рис. 5.7. Размеры посадочного места в головке цилиндров ДВС под свечу зажигания с резьбой на корпусе M14x1,25 мм и с конической опорной поверхностью.

Технические требования к свечам зажигания определяются ОСТ 37.003.081-98 и Техническим регламентом о безопасности колесных транспортных средств,

Требования Технического регламента о безопасности колесных транспортных средств, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 10 сентября 2009 г., № 720 вступают в силу 23 сентября 2010 г. Этим нормативным документом предъявляются следующие общие требования к изделиям системы зажигания для ДВС с искровым зажиганием. В соответствии с п. 92 приложения № 9 «Перечень требований к типам компонентов транспортных средств» изделия входящие в состав системы зажигания должны обеспечивать:

- бесперебойное искрообразование;
- электромагнитную совместимость;
- работоспособность в условиях окружающей среды;
- вибро- и ударопрочность;
- работоспособность при изменении напряжения;
- электрическую прочность изоляции.

Кроме того, искровые свечи зажигания должны обеспечивать:

- бесперебойность искрообразования при заданном давлении газа;
- прочность при приложении механических нагрузок;
- термическую прочность;
- электрическое сопротивление.

При одобрении типа транспортного средства в документах должна быть указана маркировка свечи зажигания.

Технические требования ОСТ 37.003.081-98 (планируется его замена на государственный стандарт в соответствии с Регламентом) предусматривают следующее.

Изолятор свечи зажигания должен соответствовать требованиям ОСТ 37.003.036-87 "Изоляторы керамические для искровых свечей зажигания. Технические условия".

Металлические детали должны иметь окисное или металлическое покрытие (цинковое или никелевое), на них не допускаются трещины и сорванные нитки резьбы. На термоосадочной канавке и в местах наложения контактов на корпус при электротермической сборке допускается частичное нарушение покрытия.

Искрообразование между электродами свечей зажигания с искровым зазором менее 0,6 мм должно быть бесперебойным при давлении газа, окружающего электроды $1,0 \pm 0,05$ МПа ($10 \pm 0,5$ кгс/см²). При искровом зазоре 0,6 мм и более давление газа должно быть $0,85 \pm 0,05$ МПа ($8,5 \pm 0,5$ кгс/см²).

Герметичность свечи зажигания определяется как суммарная утечка газа через соединение корпуса с изолятором и изолятора с центральным электродом при разнице давлений $2,0 \pm 0,05$ МПа ($20,0 \pm 0,5$ кгс/см²), она не должна превышать 5 см³/мин.

Механическая прочность свечей зажигания с плоской опорной поверхностью определяется тем, что они должны выдерживать механические нагрузки:

- крутящий момент 45 Нм, приложенный к шестиграннику корпуса;
- усилие 400 Н, приложенное под прямым углом к контактной головке для свечей с размером шестигранника под ключ 20,8 мм и 300 Н при шестигранниках 16 и 19 мм;
- растягивающую силу 300 Н, приложенную к контактной головке вдоль ее оси.

Механическая прочность свечей зажигания с конической опорной поверхностью определяется тем, что они должны выдерживать механические нагрузки:

- крутящий момент 25 Нм, приложенный к шестиграннику корпуса;
- усилие 300 Н, приложенное под прямым углом к контактной головке;
- растягивающую силу 300 Н, приложенную к контактной головке вдоль ее оси.

Боковой электрод (электрод массы) должен быть надежно закреплен на корпусе. Свечи должны выдерживать без повреждений вибрационные и ударные нагрузки, возникающие на двигателе в процессе его работы.

Толщина уплотнительного кольца свечей зажигания с плоской опорной поверхностью должна быть от 1,4 до 2,0 мм после однократной затяжки усилием 30 Нм (3 кгсм).

Омическое сопротивление изоляции между контактной головкой и корпусом при температуре 550 ± 15 °C должно быть не менее 5,0 МОм.

Допустимое отклонение калильного числа, установленное для данного типа свечи, не должно превышать ± 10 %.

Электрическая прочность изолятора для свечей зажигания с размерами шестигранника под ключ 16,0 и 19 мм в сборе с электродом и контактной головкой определяется тем, что он должен выдерживать испытательное напряжение 18 кВ. При шестиграннике 20,8 мм изолятор должен выдерживать 22 кВ (действующее значение при частоте 50 Гц).

Величина электрического сопротивления встроенного в цепь центрального электрода (установленного в канале изолятора) помехоподавительного резистора в состоянии поставки при температуре (25 ± 10) °C должна быть от 4 до 13 кОм. При воздействии температуры в диапазоне от минус 40 до плюс 300 °C эта величина должна быть от 2 до 50 кОм, а после воздействия импульсов высокого напряжения и в процессе эксплуатации - от 2 до 50 кОм.

Вибро- и ударопрочность свечей зажигания определяется тем, что они должны выдерживать без повреждений вибрационные и ударные нагрузки, возникающие на двигателе в процессе его работы.

Удобство обслуживания определяется тем, что конструкция свечей должна допускать чистку теплового конуса изолятора от нагара и регулирование искрового зазора.

Маркировка свечей зажигания в соответствии с ОСТ 37.003.081-98 должна включать в себя условное обозначение типа, дату изготовления (месяц или квартал или две последние цифры года изготовления); наименование или товарный знак изготовителя; наименование страны изготовления.

Условное обозначение типа свечи зажигания включает в себя следующее:
- первая буква обозначает резьбу на корпусе М14х1,25 – «А».

- вторая буква (для свечей с плоской опорной поверхностью) обозначает размер шестигранника под ключ: 16 мм – «У»; 19 мм – «М» (если маркировка не содержит букв «У» или «М», размер шестигранника под ключ 20,8 мм);
- вторая буква (для свечей с коническим посадочным местом) обозначает коническую опорную поверхность- «К»;
- первая после одной или двух букв цифра - калильное число, выбираемое из ряда 8; 11; 14; 17; 20; 23, 26 (допускается применение любых целых чисел).
- далее буквой обозначается:
 - длина резьбовой части корпуса для свечей с коническим посадочным местом: 7,8 мм – «М»; 17,5мм. – «Д»; 25 мм – «С» (если маркировка не содержит букв «М», «Д» или «С» перед обозначением калильного числа, длина резьбовой части корпуса 11,2 мм);
 - длина резьбовой части корпуса для свечей с плоской опорной поверхностью: 19мм. – «Д». Если маркировка не содержит буквы «Д», длина резьбовой части корпуса 12,7 мм, за исключением свечей зажигания с размером шестигранника под ключ 19мм., для которых этот размер один - 9,5мм;
- далее буквой обозначается выступание теплового конуса изолятора за торец корпуса - «В».
- далее буквой обозначается наличие встроенного резистора - «Р»;
- далее буквой обозначается биметаллический центральный электрод: «М»;
- далее, в конце маркировки, одной или двумя цифрами обозначается порядковый номер разработки или модернизации (кроме базовых конструкций).

Пример условного обозначения свечи с резьбой на корпусе М14х1,25, калильным числом 17, длиной резьбовой части корпуса 19 мм, имеющей выступание теплового конуса изолятора за торец корпуса, со встроенным помехоподавительным резистором, с биметаллическим центральным электродом и имеющей базовую конструкцию.

Свеча зажигания А17ДВРМ ОСТ 37.003.081-98

Кроме условного обозначения типа, на каждой свече должно быть указано:

- дата изготовления (месяц или квартал или две последние цифры года изготовления);
- наименование или товарный знак изготовителя;
- наименование страны изготовления.

5.2. Основные этапы работ

Разработка свечей зажигания осуществляется на основании собственных исследований, ведущихся разработчиком научно-исследовательских работ в области свечей зажигания, анализа опыта накопленного в эксплуатации с учетом передового мирового опыта и анализа патентных материалов в следующем порядке (при определенных условиях некоторые этапы могут пропускаться):

- разработка и согласование технического задания и габаритного чертежа;
- поверочный расчет электрической прочности изолятора свечи зажигания с выбранными размерами;
- тепловой расчет и определение требуемой тепловой характеристики (калильного числа) свечи зажигания с учетом рабочих параметров и конструкции ДВС, для которого она предназначена;
- конструирование, изготовление и лабораторные испытания опытных образцов (как правило, три варианта для подбора по тепловой характеристике). Проведение подбора по тепловой характеристике;
- выбор оптимального варианта по тепловой характеристике (калильному числу), корректировка конструкции свечи зажигания по результатам испытаний;
- разработка полного комплекта конструкторской документации на свечу зажигания: рабочих чертежей, технических условий согласованных в установленном порядке с заказчиком, карты технического уровня, патентного формуляра;
- изготовление опытно - промышленной (заводской) партии, проведение типовых (приемочных) испытаний по ОСТ 37.003.081-08 и оформление акта приемочных (типовых) испытаний;

- подготовка и начало серийного производства (проводится силами завода-изготовителя свечи зажигания);
- сертификация и контроль качества выпускаемой продукции.

5.3. Расчет электрической прочности изолятора

Задачей расчета является определение таких размеров и параметров изоляционных деталей свечи, при которых напряженность электрического поля не превышает значений, соответствующих возникновению короны, и не произойдет пробоя по объему изолятора или перекрытия по поверхности изолятора. Расчет на электрическую прочность осуществляется в радиальном направлении в различных сечениях и на перекрытие по поверхности изолятора.

На рис. 5.8 приведена структурная схема концентрического расположения отдельных слоев керамики изолятора, на рис 5.9 - распределение электрического поля по наружной поверхности изолятора, на рис 5.10 - электрическая схема замещения наружной поверхности изолятора.

Отдельные слои керамики, воздушных зазоров в корпусе свечи относительно центрального электрода расположены концентрично. При таком расположении цилиндрические поверхности являются уровнями, а силовые линии высокого напряжения направлены по радиусам цилиндров, пересекаясь нормально с поверхностями раздела сфер.

Емкости отдельных слоев на единице длины изолятора свечи определяются по формулам:

$$C_{V,i} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_i}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}; \quad i = 1, \dots, m; \quad r_0 = r. \quad (4.71)$$

Здесь r_i – радиус i – го слоя диэлектрика, а ϵ_i – его диэлектрическая проницаемость (относительная).



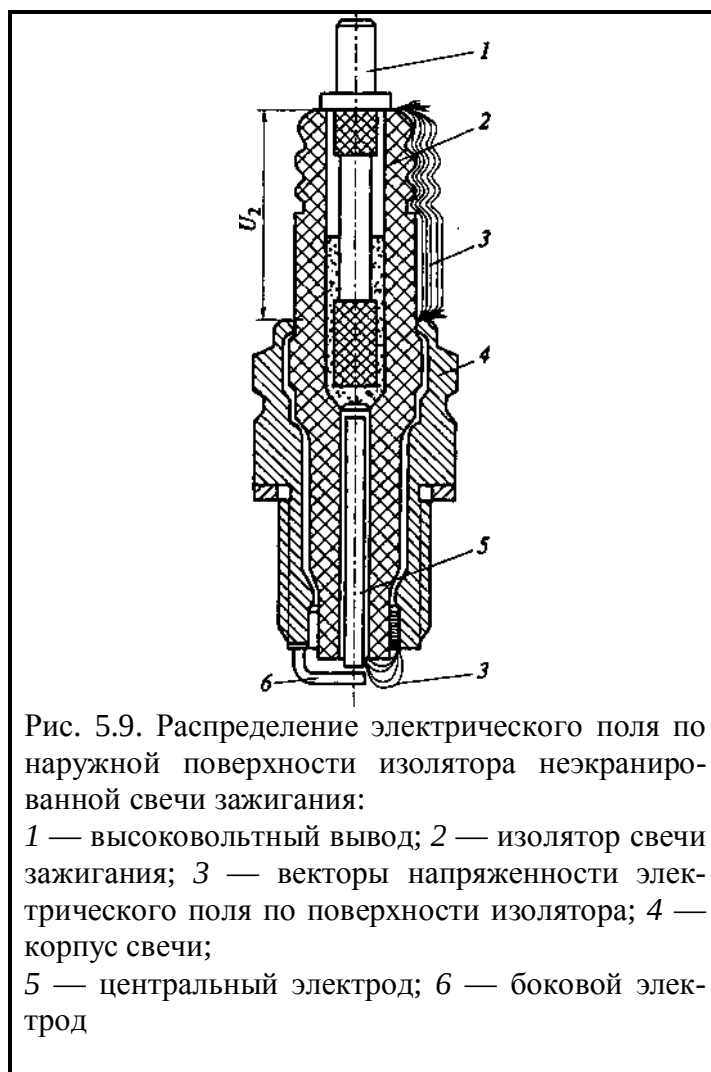
Рис. 5.8. Структурная схема концентрического расположения отдельных слоев керамики изолятора свечи зажигания: U_0 — напряженность электрического поля на поверхности изолятора; $r_0... r_n$ — радиусы слоев изолятора

Результирующая емкость свечи в месте вероятного пробоя определяется формулой:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\epsilon_i}}, \quad (4.72)$$

где n — число слоев диэлектрика.

Из условия непрерывности нормальной составляющей электрической индукции $D_{\perp} = \epsilon_0 \epsilon(r) E_{\perp}$ на границе между каждой парой $(i-1)$ -го и i -го слоев диэлектрика следует, что напряжение ΔU_i между отдельными слоями распределяется обратно пропорционально их емкости.



Поэтому при приложении высокого напряжения U_{2m} между центральным электродом свечи и электродом массы, в слое в слое с номером k на цилиндре радиусом r напряженность электрического поля можно вычислить по приведенной в монографии [3] формуле:

$$E_k(r) = U_{2m} \left(\varepsilon_k r \sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\varepsilon_i} \right)^{-1}. \quad (4.73)$$

Из этого следует, что в каждом слое наибольшая напряженность поля наблюдается у его внутренней поверхности, а наименьшая — у наружной. Наибольшая величина напряженности поля (градиента напряжения) получается у того слоя, у которого величина $\varepsilon_k r_k$ — наименьшая.

Если $E_{1\text{crt}}$, $E_{2\text{crt}}$, $E_{3\text{crt}}$ и т.д. – критические напряженности, при которых происходит пробой (разрушение) диэлектрика, но наилучшее использование диэлектрика будет иметь место при выполнении условия

$$U_{2m} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\varepsilon_i} \right)^{-1} = E_{1\text{crt}} \varepsilon_1 r_0 = E_{2\text{crt}} \varepsilon_2 r_1 = E_{3\text{crt}} \varepsilon_3 r_2 = \dots \quad (4.74)$$

Если все диэлектрики имеют одинаковую электрическую прочность, т.е.

$E_{1\text{crt}} = E_{2\text{crt}} = E_{3\text{crt}} = \dots$, то условие (4.74) сводится к следующему:

$$\varepsilon_1 r_0 = \varepsilon_2 r_1 = \varepsilon_3 r_2 = \dots = \varepsilon_n r_{n-1}. \quad (4.75)$$

Исходя из этого, с увеличением радиусов диэлектрическая проницаемость слоев должна убывать. Наибольшие значения напряженности получаются в воздушном зазоре. Расчеты показывают, что пробивное напряжение воздушного зазора между центральным электродом и керамикой изолятора (тепловой конус) равно 7,5 кВ, а теплового конуса свечи — около 32 кВ. Эти значения определяют испытательное напряжение по проверке электрической прочности изолятора свечи 28 кВ.

При необходимости рассчитать влияние поверхностного разряда (перекрытия) на рабочие характеристики свечи следует задаться геометрическими размерами свечи, численными значениями удельной и поверхностной проводимостей изолятора, удельным сопротивлением утечки его материала, а также законом изменения напряжения на центральном электроде и найти численное решение системы уравнений (3.17) или (3.21). Следует отметить, что при наличии достаточно надежных численных оценок указанных коэффициентов, при помощи этих же уравнений можно исследовать разрядные процессы в свечах поверхностного разряда.

5.4. Расчет тепловых характеристик свечи зажигания.

Результаты расчетов по методике, описанной в главе 4, были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в Научно-исследовательском и экспериментальном институте автомобильной электроники и

электрооборудования (ФГУП НИИАЭ) на установке для определения калильных чисел свечей зажигания УВП-3. Она представляет собой одноцилиндровый двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием и регулируемым коэффициентом наполнения η_v (регулируемым наддувом). Конструкция УВП-3 и методика работы с этой установкой описаны ниже в главе 6.

На установке УВП-3 были выполнены экспериментальные исследования тепловых режимов основных конструктивных элементов всех типов свечей зажигания, выпускавшихся отечественной промышленностью. Рассогласование между результатами расчета и экспериментальными данными, как показано на рис. 5.№1, составило не более 5%, что полностью подтвердило систему допущений, заложенную в расчетные методики главы 4.

Использование математического моделирования температурного поля свечи зажигания в сопоставлении с экспериментальными данными позволило исследовать влияние наиболее существенных конструктивных факторов на температуру ее центрального электрода $t_{ц.э.}, ^\circ\text{C}$, температуру теплового конуса $t_{т.к.}, ^\circ\text{C}$, а также на ее калильное число. По результатам расчетно-экспериментальных исследований в работе [34] построены графики (см. рис 5.10 – 5.14), позволяющие на стадии эскизного проектирования свечи зажигания спрогнозировать ее тепловые характеристики. При проектировании новой конструкции свечи целесообразно руководствоваться следующими правилами, сформулированными в работе [34]:

- Последовательное уменьшение с шагом 1 мм теплового конуса изолятора длиной от 14 до 11 мм приводит к увеличению калильного числа свечи в среднем на 1,1 условные единицы по ОСТ 37.003.081-98, а при длинах теплового конуса от 10 до 4 мм – в среднем на 2,5 условные единицы.
- Последовательное уменьшение с шагом 1 мм выступания теплового конуса изолятора за торец резьбовой части корпуса свечи зажигания приводит к увеличению ее калильного числа в среднем на 1,8 условных единиц в диапазоне калильных чисел от 16 до 19 условных единиц.

- Увеличение теплопроводности материала изолятора путем замены керамики группы II на керамику группы I по ОСТ 36.003.036-86 «Изоляторы керамические для свечей зажигания» в диапазоне калильных чисел от 16 до 19 приводит к увеличению калильного числа свечи зажигания на 1–2 условные единицы.
- Последовательное уменьшение с шагом 1 мм выступания центрального электрода за торец теплового конуса изолятора в пределах от 0,5 до 2,5 мм приводит к увеличению калильного числа свечи зажигания в среднем на 3,7 условных единиц в диапазоне калильных чисел $13,5 \div 21,0$ условных единиц.
- Повышение теплопроводности материала центрального электрода, например – при замене монометаллического, изготовленного из сплава Х25Т, на биметаллический, содержащий алюминиевый сердечник, приводит к увеличению калильного числа свечи зажигания на 6–7 условных единиц в диапазоне калильных чисел от 17 до 24 условных единиц.

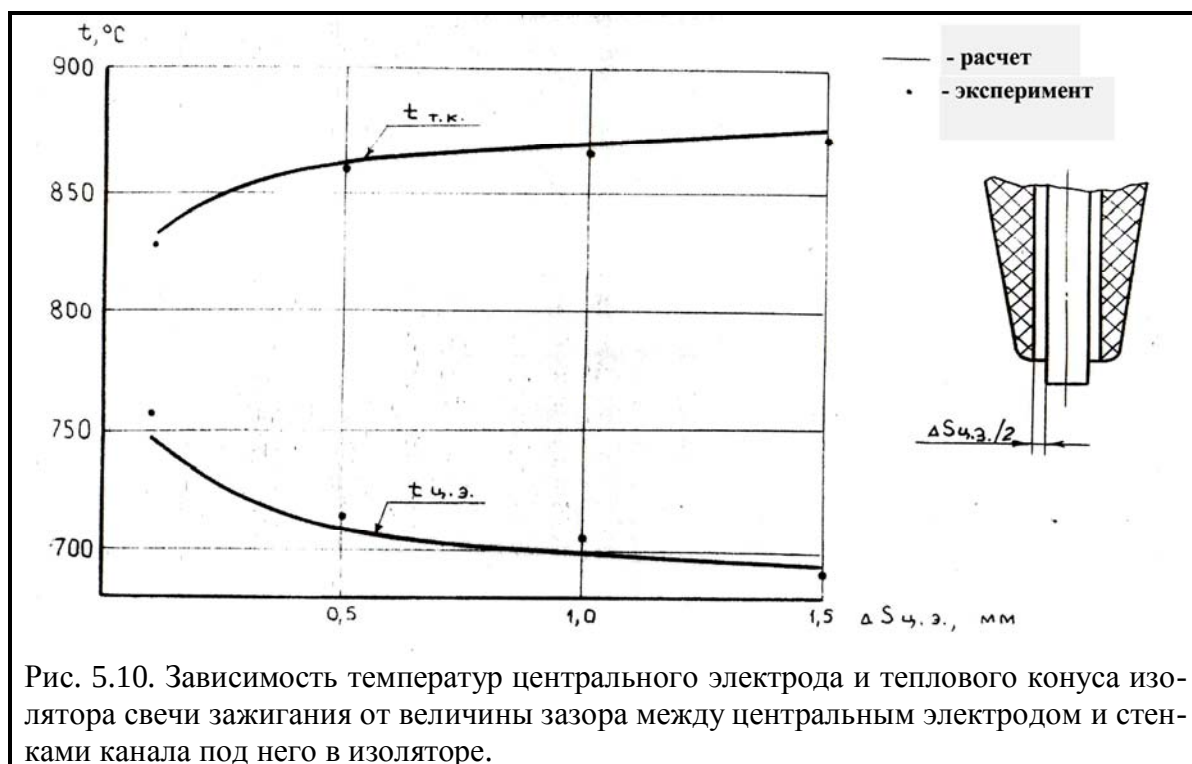


Рис. 5.10. Зависимость температур центрального электрода и теплового конуса изолятора свечи зажигания от величины зазора между центральным электродом и стенками канала под него в изоляторе.

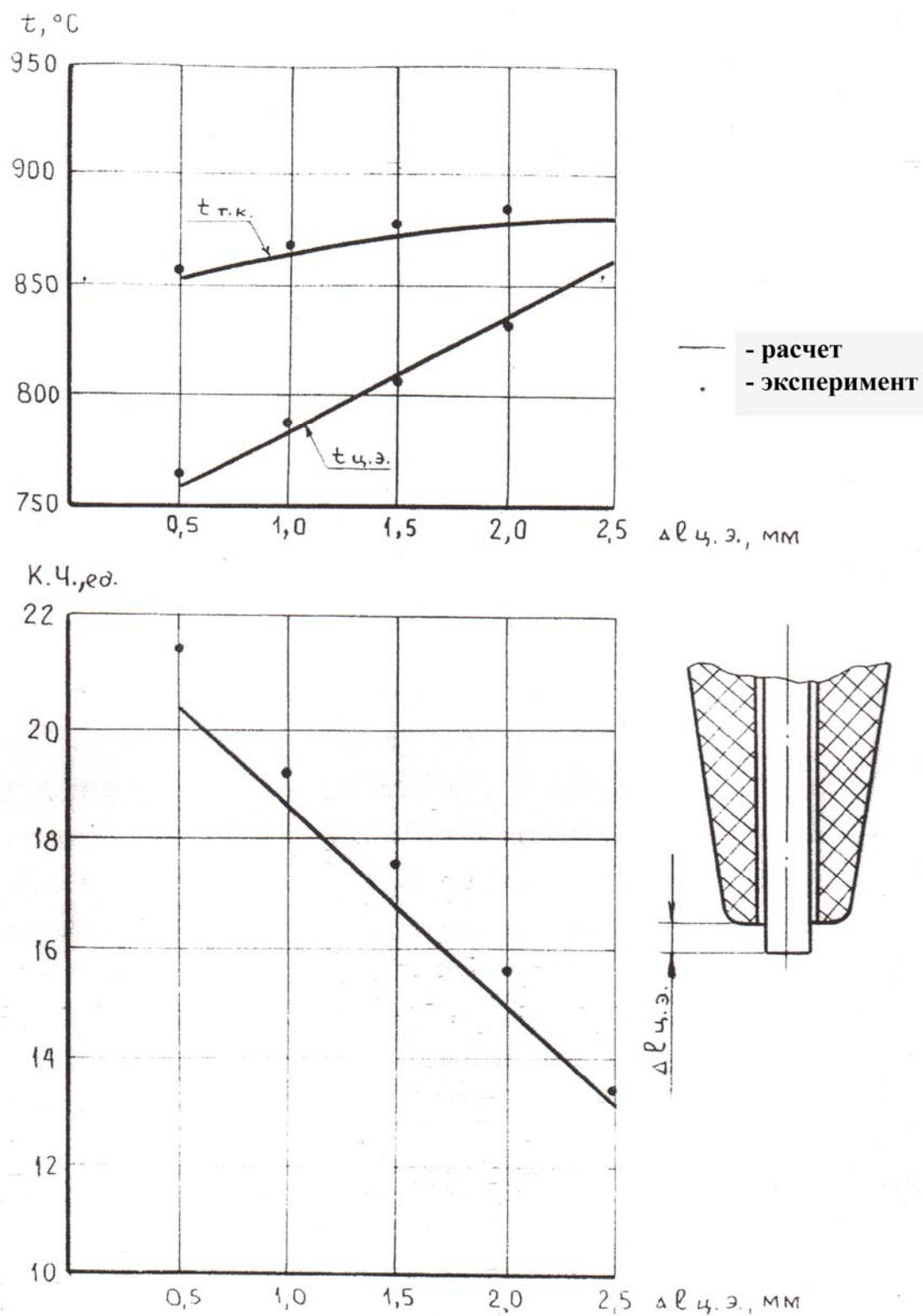


Рис. 5.11. Зависимость температур теплового конуса изолятора и центрального электрода, а также калильного числа свечи от величины выступания центрального электрода за торец теплового конуса.

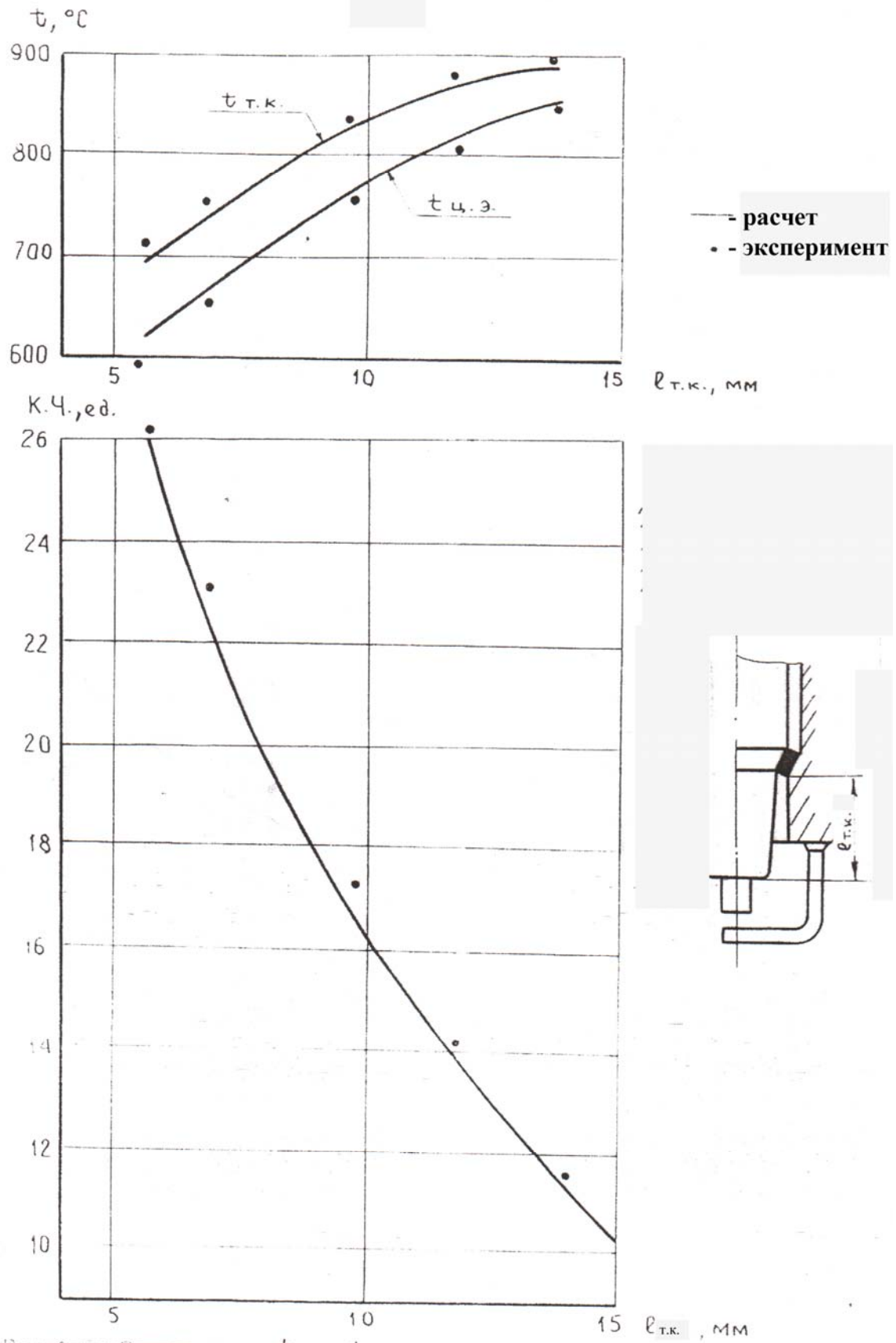


Рис. 5.12. Зависимость температур теплового конуса изолятора и центрального электрода, а также калильного числа свечи от длины теплового конуса изолятора.

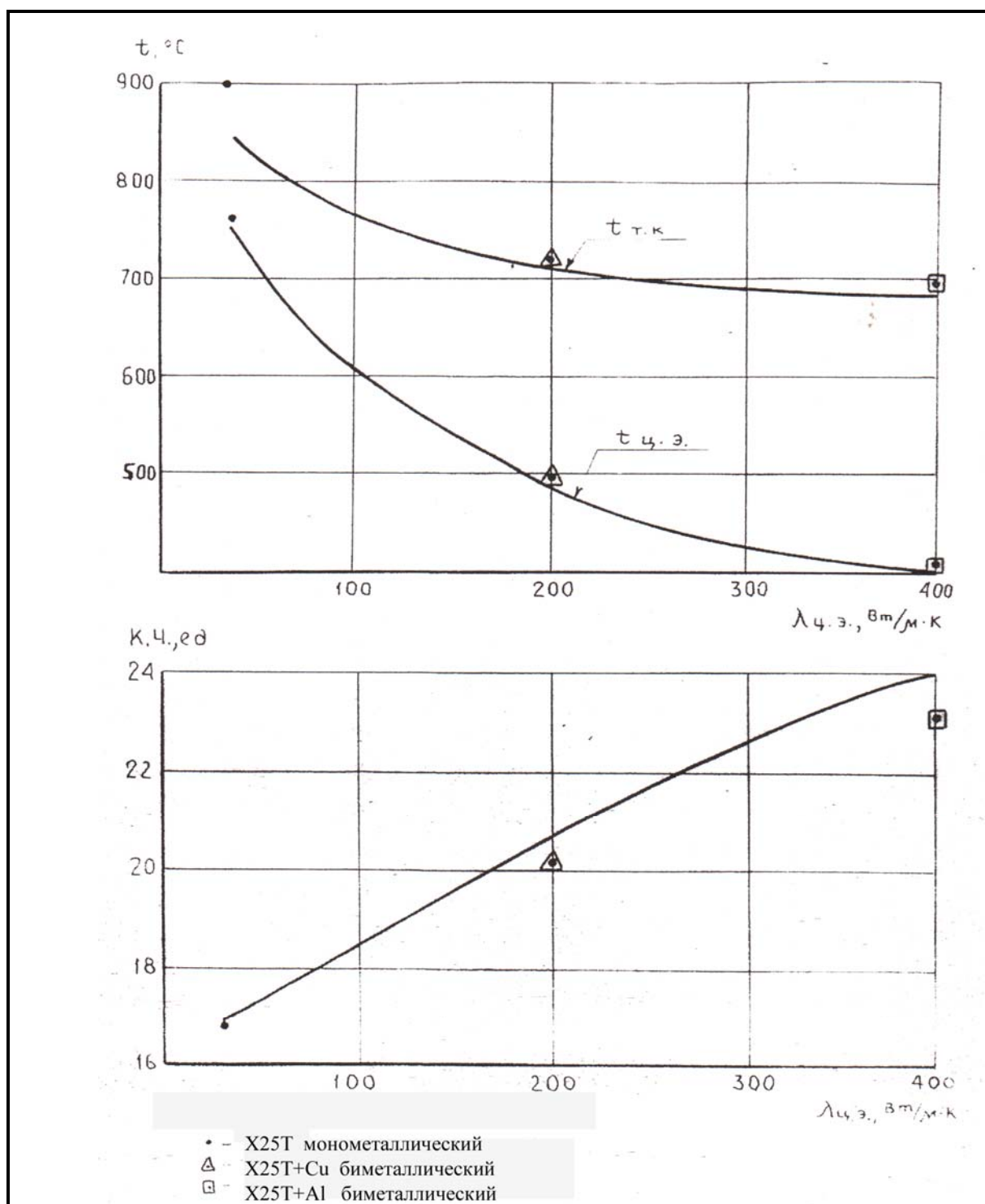


Рис. 5.13. Зависимость температуры теплового конуса изолятора и центрального электрода, а также калильного числа свечи зажигания от теплопроводности материала центрального электрода.

Глава 6. Испытания и контроль качества

6.1. Лабораторные испытания

Виды и объем лабораторных испытаний. Для проверки соответствия свечей зажигания требованиям ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые. Общие технические условия» проводят приемо-сдаточные, периодические и типовые испытания. Объем лабораторных испытаний каждого вида указан в таблице 6.1. Испытания по определению калильного числа с использованием моторных установок типа УВП представлены в разделе 6.2; связанные с подбором к ДВС по тепловой характеристике – в разделе 6.3; дорожно-эксплуатационные – в разделе 6.4.

Таблица 6.1. Виды и объем лабораторных испытаний свечей зажигания по ОСТ 37.003.081-98.

Наименование проверок и испытаний	Номера пунктов требований ОСТ 37.003.081-98	Обязательность проведения проверки при испытаниях		
		Типовые	Приемо-сдаточные	Периодические
1	2	3	4	5
1. Проверка габаритных и присоединительных размеров	4.1	+	+	+
2. Проверка внешнего вида изолятора и металлических деталей	5.2; 5.4	+	+	+
3. Проверка покрытий металлических деталей	5.3	+	+	—
4. Проверка бесперебойности искрообразования	5.5	+	+	+
5. Проверка величины утечки газа через соединения свечи зажигания (кроме соединения по уплотнительному кольцу)	5.6	+	+	+
6. Проверка механической прочности	5.7	+	+	—
7. Проверка толщины уплотнительного кольца	5.8	+	+	—
8. Проверка омического сопротивления изолятора	5.9	+	—	—
9. Проверка калильного числа	5.10	+	+	—
10. Испытание на теплостойкость	5.11	+	+	—
11. Испытание на холодостойкость	5.11	+	+	—
12. Проверка надежности приварки электрода массы	5.12	+	+	—

Продолжение таблицы 6.1.

1	2	3	4	5
13. Испытание электрической прочности изолятора в сборе с электродом и контактной головкой	5.13	+	–	–
14. Проверка вибро- и ударопрочности	5.14	+	–	–
15. Проверка возможности очистки от нагара и регулирования искрового зазора.	5.15	+	–	–
16. Проверка величины электрического сопротивления встроенного резистора в состоянии поставки	5.16	+	+	+
17. Проверка величины сопротивления встроенного резистора при воздействии изменения температуры	5.17	+	–	–
18. Проверка величины сопротивления резистора после воздействия импульсов высокого напряжения	5.18	+	–	–
<i>Примечания:</i> 1. Знак «+» испытания проводят; знак «–» испытания не проводят. 2. Последовательность испытаний устанавливает предприятие-изготовитель.				

Типовые испытания должны проводиться при изменении конструкции, технологии, применяемых материалов, если эти изменения могут оказать влияние на характеристики свечей зажигания. Допускается в технически обоснованных случаях проводить испытания свечей зажигания только на соответствие тем требованиям и параметрам, на которые могут повлиять вносимые изменения. Испытания проводят не менее чем на трех изделиях.

Периодические испытания должны производиться не реже одного раза в три месяца (ежеквартально). Испытаниям в первой выборке подвергают не менее десяти штук свечей зажигания каждого типа из числа изделий, прошедших приемосдаточные испытания, а проверке калильного числа – не менее трех штук. Допускается совмещать различные виды испытаний на одних и тех же образцах свечей зажигания. Если свечи зажигания изготавливают в нескольких модификациях, то периодические испытания проводят на одной из модификаций.

Если при испытании первой выборке хотя бы одна свеча зажигания не удовлетворяет требованиям стандарта, то проводят повторные испытания на

второй выборке из удвоенного числа свечей зажигания по тем пунктам, по которым образцы первой выборки не выдержали испытания. Результаты периодических испытаний считаются положительными, если во второй выборке не будет выявлено свечей зажигания, не соответствующих требованиям по проверенным пунктам.

Приемо-сдаточные испытания проводят методом статистического приемочного контроля по ГОСТ 18242, при этом план контроля устанавливается предприятием-изготовителем в технологической документации на свечи зажигания.

Методика лабораторных испытаний. Перед проверками и испытаниями свечи зажигания должны быть очищены и просушены, а искровой зазор должен быть отрегулирован. Контактную гайку (если она съемная) и уплотнительное кольцо допускается демонтировать.

Проверку габаритных и присоединительных размеров проводят универсальными и специальными инструментами и приборами.

Проверку внешнего вида изолятора и металлических деталей проводят визуально без применения увеличительных приборов.

Испытание антикоррозионных свойств металлических деталей, имеющих окисное или никелевое покрытие, проводят в камере соляного тумана в течение 2 ч 30 мин. В случае применения окисного покрытия, соответствующие металлические детали свечи зажигания предварительно пропитывают маслом. Туман образуют распылением раствора хлористого натрия в воде в количестве (20 ± 3) г/л при температуре $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$. Свечи зажигания располагают в камере испытательного устройства так, чтобы в процессе испытания брызги раствора, капли с потолка стен и систем подвесов, не попадали на изделие. Распыление производят в течение 15 мин через каждые 45 мин.

Антикоррозионные свойства металлических покрытий (кроме никелевого) проверяют в камере соляного тумана по методике ГОСТ Р 52230 - 2004 в течение 24 ч. Для свечей зажигания, изготавливаемых для потребностей обороны

страны, антикоррозионные свойства металлических покрытий проверяют в камере соляного тумана по методике ГОСТ 3940 в течение 48 ч.

Свечи зажигания считают выдержавшими испытания, если после испытания отсутствует разрушение защитного покрытия, оголяющего основной металл. Допускаются очаги коррозии основного металла на острых кромках, углублениях деталей, на резьбовых участках и частях корпуса с нарушенным при термической осадке защитным покрытием.

Проверку бесперебойности искрообразования проводят путем установки свечи зажигания в барокамеру, обеспечивающую получение необходимого избыточного давления газа и обеспечивающую возможность наблюдения и (или) регистрирования искрообразования между электродами свечи зажигания. Проверку осуществляют в течение времени не менее 30 с после подведения испытательного напряжения величиной не менее 22 кВ (амплитудное значение). При давлении в барокамере, установленном для данной величины искрового зазора, искрообразование должно быть бесперебойным.

Проверку величины утечки газа через соединения деталей свечи зажигания проводят путем установки свечи зажигания в барокамеру, обеспечивающую получение необходимого избыточного давления газа. Величину утечки газа измеряют в течение времени не менее 30 с. При этом утечку газа через соединения свечи с барокамерой, в том числе и по уплотнительному кольцу свечи зажигания, не учитывают. Допускается проводить контроль на свечах зажигания с плоской опорной поверхностью, не укомплектованных уплотнительными кольцами.

Проверку механической прочности проводят путем монтажа свечи зажигания в соответствующее резьбовое отверстие стальной закаленной пластины и приложения раздельно крутящего момента к шестиграннику под ключ, изгибающего и растягивающего усилий к контактной головке. Свечи зажигания считаются выдержавшими испытания, если корпус и изолятор не имеют механических повреждений, контактная головка не извлеклась из изолятора и после

испытаний свечи зажигания соответствуют требованиям по бесперебойности искрообразования и герметичности (утечке газа).

Проверку толщины уплотнительного кольца свечей зажигания с плоской опорной поверхностью проводят после затяжки усилием не менее 30 Нм свечи зажигания в соответствующее резьбовое отверстие стальной закаленной пластины и ее демонтажа. Толщина уплотнительного кольца после однократной затяжки должна быть от 1,4 до 2,0 мм.

Проверку омического сопротивления изоляции проводят измерительными приборами класса 1 после нагрева свечи зажигания в печи с температурой (550 ± 15) С. Свечу зажигания ввертывают в соответствующее резьбовое отверстие металлической пластины и помещают в печь на 5 мин. Измерение сопротивления проводят не позже чем через 1 мин после извлечения свечи зажигания из печи. Допускается проводить измерение, не извлекая свечу зажигания из печи.

Проверку калильного числа проводят по методу, указанному в разделе 6.2 настоящей главы (см. ниже). Допускается осуществлять проверку (определение) калильного числа свечей зажигания иными методами.

Испытание на теплостойкость проводят путем нагревания ввертной части свечи зажигания в течение (10 ± 1) мин при температуре (700 ± 15) С в печи. Затем свечу зажигания подвергают естественному охлаждению на воздухе при температуре (20 ± 5) С. При помещении в нагревательное устройство (печь) испытуемые свечи зажигания устанавливают в отверстия пластины, имеющей толщину, равную длине ввертной части испытываемой свечи зажигания. Отверстия в пластине должны быть на 0,5 мм больше максимального наружного диаметра резьбы на корпусе свечи зажигания. Пластина состоит из двух стальных листов и асбестовой прокладки между ними; до установки свечей зажигания она прогревается вместе с печью. Температуру в печи измеряют при помощи термопары, расположенной в центре пластины и опущенной на (50 ± 1) мм ниже пластины. Свечи зажигания считают выдержавшими испыта-

ния, если они после испытания отвечают требованиям по бесперебойности искрообразования и герметичности (утечке газа).

Наличие трещин на изоляторе определяют визуально путем нанесения на его поверхность 0,5 % раствора эозина или фуксина в этиловом техническом спирте с последующим промыванием в проточной воде и просушиванием.

Холодостойкость свечи зажигания определяют в холодильной камере где ее выдерживают при температуре минус 45 С в течение трех часов. Затем свечу зажигания подвергают естественному охлаждению на воздухе в течение 30 мин при температуре (20 ± 10) С. Свечи зажигания считают выдержавшими испытания, если они после испытания отвечают требованиям по бесперебойности искрообразования и герметичности (утечке газа).

Проверку надежности приварки электрода массы проводят однократным отгибанием его на 90^0 и возвращением в исходное положение. Отрыв электрода и наличие трещин в месте приварки не допускаются.

Электрическую прочность изолятора в сборе с электродом и контактной головкой, проводят после извлечения из корпуса свечи зажигания. Испытание проводят на специальных высоковольтных установках для испытания твердых диэлектриков (АМИ-60; АМИ-70; АИИ-90 и т.д.) с измерительным устройством, проградуированным по ГОСТ 1516.1,

ГОСТ 1516.2. Испытуемый изолятор в сборе должен быть вставлен в металлическое кольцо, не имеющее острых кромок (радиус скруглений 0,5 мм), охватывающее максимальный диаметр пояска изолятора. Нижняя фаска пояска изолятора должна опираться на буртик контактирующего кольца высотой не более 1 мм. Высота кольца должна быть равна высоте пояска изолятора, а толщина стенок должна быть не более 1 мм. Зазор между испытываемым изолятором в сборе и контактирующим кольцом должен быть в пределах допуска на изолятор. Изолятор с контактирующим устройством помещают тепловым конусом вниз в конденсаторное масло по ГОСТ 5775 или трансформаторное масло по ГОСТ 982 и ГОСТ 10121 с электрической прочностью, не допускающей появление разряда по поверхности. Уровень масла не должен быть ниже

30 мм от верхней кромки контактирующего кольца, а изолятор в сборе не должен касаться дна и стенок сосуда.

При испытании напряжение прикладывают к контактной головке и повышают до величины 15 кВ с произвольной скоростью, далее со скоростью (1-2) кВ/с до величины 22 кВ, эффективное значение. При этой величине напряжения изолятор выдерживают в течение 30 с. Допускается проводить испытание, повышая напряжение с нуля со скоростью (1-2) кВ в секунду. Напряжение повышают до величины, при которой происходит пробой изолятора (она должна быть не менее 22 кВ, эффективное значение).

Вибро- и ударопрочность свечей зажигания проверяют по ГОСТ Р 52230 - 2004 на специальном стенде в условиях работы изделий, устанавливаемых на двигатель. Испытания проводят путем воздействия вибрационных нагрузок с частотой вибрации 50 - 250 Гц с максимальными ускорениями (замедлениями) $100 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ в течение 8 часов и 10000 ударных нагрузок с максимальными ускорениями (замедлениями) $150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. Свечи зажигания считают выдержавшими испытания, если после испытаний они не имеют механических повреждений и соответствуют требованиям по бесперебойности искрообразования и герметичности (утечке газа).

Возможность очистки от нагара и регулирование искрового зазора свечей зажигания проводят с использованием специального устройства для очистки и проверки искровых свечей зажигания, например Э203П, показанный на рис. 6.1.

Электрическое сопротивление встроенного резистора в состоянии поставки измеряют при температуре $(25 \pm 10) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха не более 85%, а при воздействии температуры в диапазоне от -40 до $+300 ^\circ\text{C}$ определяют в следующем порядке:

- измеряют величину электрического сопротивления встроенного в цепь центрального электрода (установленного в канале изолятора) помехоподавительного резистора, как в состоянии поставки;

- выдерживают свечу зажигания в течение 2 часов при температуре 150 °С и измеряют величину электрического сопротивления цепи центрального электрода;
- выдерживают свечу зажигания в течение 30 мин при температуре (20 ± 10) °С и измеряют величину электрического сопротивления цепи центрального электрода;
- выдерживают свечу зажигания в течение 15 мин при температуре 300 °С;
- выдерживают свечу зажигания в течение 30 мин при температуре (20 ± 10) °С и измеряют величину электрического сопротивления цепи центрального электрода;
- выдерживают свечу зажигания в течение 30 мин при температуре от –38 °С до –40 °С;
- выдерживают свечу зажигания в течение 30 мин при температуре (20 ± 10) °С и измеряют величину электрического сопротивления цепи центрального электрода.



Стабильность встроенного резистора проверяют после воздействия в течение 250 часов при температуре (25 ± 10) С импульсами высокого напряжения величиной 15 - 25 кВ, частотой (20 ± 5) Гц, Допускается осуществлять про-

верку стабильности электрического сопротивления встроенного резистора после воздействия в течение 50 часов при температуре (200 ± 10) С импульсов высокого напряжения величиной 15 - 25 кВ, частотой (20 ± 5) Гц.

6.2. Определение калильного числа.

В соответствии с ОСТ 37.003.081-98 «калильное число» – число, характеризующее свойство свечи не вызывать калильного зажигания накаливаемыми точками своих деталей при стандартных условиях. Калильным зажиганием называется полностью или частично неуправляемое зажигание рабочей смеси в ДВС, вызванное источником зажигания (например, накалившимся клапаном) независимым от искры в свече зажигания. При измерении калильного числа свечи зажигания, зажигание должно вызывать исключительно накалившейся точкой самой свечи. Калильное число характеризует тепловые свойства свечи зажигания. Критерием для оценки тепловых свойств свечи зажигания служит величина среднего индикаторного давления (в кгс/см^2) на пороге калильного зажигания. Испытания по определению калильного числа проводятся на специальной моторной установке путем постепенного повышения тепловой нагрузки на свечу до момента, при котором появляется калильное зажигание.

Широкие исследования, связанные с калильным зажиганием в ДВС начались в середине XX века, когда применялись следующие методы определения калильного числа свечи зажигания:

- по времени работы специального ДВС с полной нагрузкой до возникновения калильного зажигания от свечи зажигания (фирма «Bosch», Германия);
- путем сравнительных испытаний свечей зажигания с эталонными образцами фирмы «Bosch», Германия;
- по максимально допустимой величине давления наддува ДВС экспериментальной установки на пороге возникновения калильного зажигания (фирма «KLG», Англия);

- по температуре изолятора и центрального электрода свечей зажигания определяемой с помощью заделанных в них термопар (фирма «Lodis», Англия);
- по ионизации искрового промежутка свечи зажигания до момента возникновения искрового разряда (ФГУП НИИАЭ, Россия, фирма «Bosch», Германия).

Моторная установка для определения калильного числа свечи зажигания в соответствии с ОСТ 37.003.081-98 состоит из одноцилиндрового четырехтактного ДВС а также из:

- систем питания топливом и воздухом, охлаждения, смазки, зажигания, выпуска отработавших газов;
- нагрузочного устройства (динамометра);
- контрольно-измерительной аппаратуры.

Рабочие параметры установок «Labeco» (США) и «УВП-3» (Россия) приведены в таблице 6.2, общий вид установки «Labeco» - на рис. 6.2, принципиальная схема установки УВП-3 – на рис. 6.3.

Двигатель внутреннего сгорания установки – жидкостного охлаждения, имеет рабочий объем $(285 \pm 4) \text{ см}^3$, степень сжатия 5,6. Для получения высоких значений величин среднего индикаторного давления он снабжен системой наддува, обеспечивающей достаточно высокое давление на впуске. ДВС оснащен головкой цилиндра со сменными вставками под свечи зажигания различных размеров и резьбовым отверстием для установки термопары в камеру сгорания.

Ионизационный метод определения калильного зажигания основан на том, что при возникновении калильного зажигания и появлении до момента искрообразования воспламенения в камере сгорания ДВС в искровом зазоре свечи зажигания резко возрастает ионизация газов.

Это приводит к значительному уменьшению величины электрического сопротивления столбика газа, находящегося в искровом промежутке, поддающегося определению с помощью специального прибора – ионизационного индикатора.

Таблица 6.2. Рабочие параметры установок «Labeco» (США) и «УВП-3» (Россия)

Наименование рабочего параметра	Величина (характеристика) параметра для установки типа	
	«Labeco»	«УВП-3»
1. Частота вращения коленчатого вала ДВС	$(2700 \pm 10) \text{ мин}^{-1}$	$(2700 \pm 10) \text{ мин}^{-1}$
2. Угол опережения зажигания	(40 ± 1) градус ПКВ	(40 ± 1) градус ПКВ
3. Система зажигания	Батарейная, или магнето	Батарейная
4. Температура воздуха на входе в двигатель	$(105 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$	$(105 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$
5. Влажность воздуха на входе в двигатель	(10 ± 3) граммов воды на 1 килограмм сухого воздуха	Не нормирована
6. Используемое топливо	Смесь 98 % химически чистого бензола (C_6H_6) и 2 % моторного масла. Допускается добавление 3 см^3 этиловой жидкости на $4 \cdot 10^3 \text{ см}^3$ смеси	Бензин марок А95, А98
7. Используемое моторное масло	Бесприсадочное моторное масло с вязкостью 20 сСт при температуре $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
8. Рабочее давление масла	$(0,85 \pm 0,1) \text{ МПа}$	$(0,65 \pm 0,1) \text{ МПа}$
9. Рабочая температура масла	$(85 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$	$(85 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$
10. Охлаждающая жидкость (ОЖ)	Вода	Вода, этиленгликоль или их смесь
11. Температура ОЖ в рубашке и в головки цилиндра ДВС	$(129 \pm 3) \text{ }^{\circ}\text{C}$	$(95 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$
11. Температура ОЖ в рубашке вставки для монтажа свечи зажигания	$(95 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$	$(95 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$
12. Состав топливозвоздушной (рабочей) смеси	Соответствующий максимальной температуре в камере сгорания на каждом нагрузочном режиме	

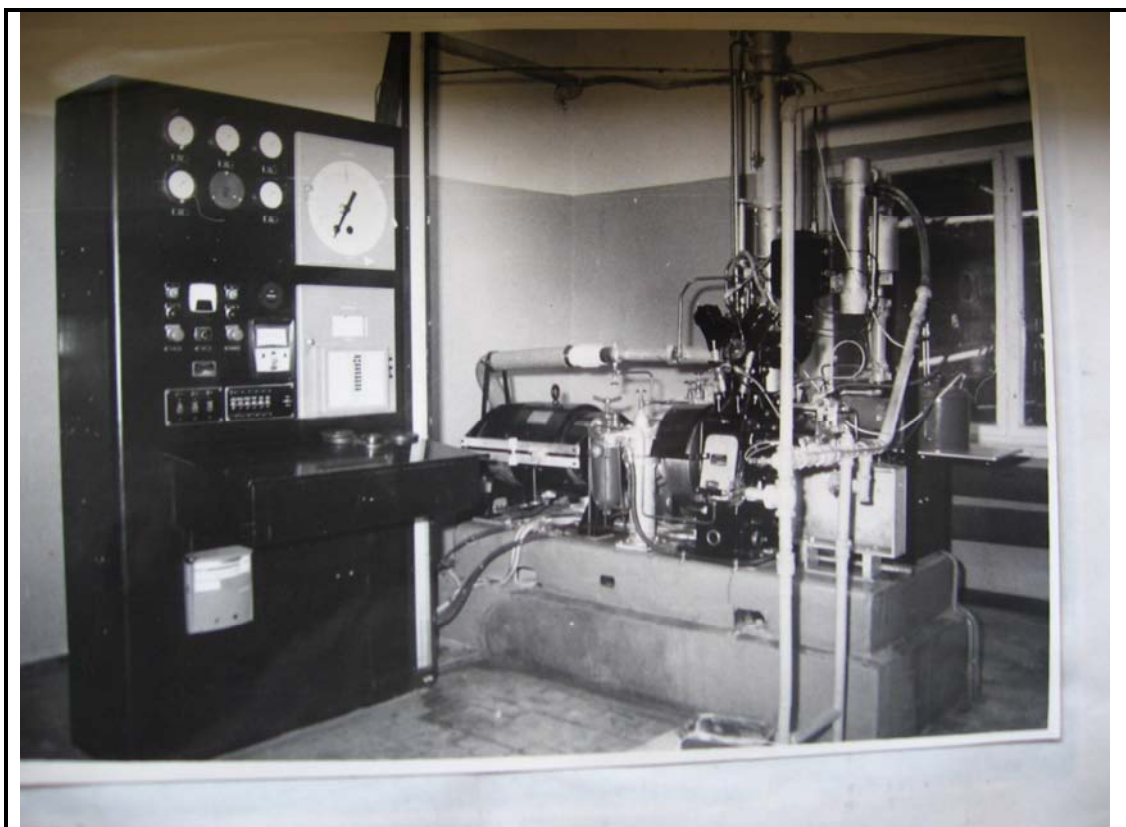


Рис. 6.2. Установка для определения калильного числа свечи зажигания типа «Labeco» (США)

Принципиальная схема индикатора калильного зажигания ИКЗ-1, разработанного и изготовленного ФГУП НИИАЭ приведена на рис. 6.4.

При определении калильного числа, свечу зажигания соединяют с высокоомным делителем, у которого величина разделительного сопротивления предохраняющего измерительную цепь прибора от импульсов высокого напряжения, значительно больше величины измеряемого сопротивления. Резкое уменьшение величины электрического сопротивления газа в искровом зазоре в результате ионизации вызывает в измерительной цепи возникновение тока от источника питания и, следовательно, падение напряжения на сопротивлении R_2 . Это падение напряжения после усиления подается на вертикальные отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки осциллоскопа и регистрируется на его экране в виде диаграммы ионизационного тока. Такая диаграмма при отсутствии калильного зажигания в цилиндре ДВС приведена на рис. 6.5, «а». В случае появления калильного зажигания указанная диаграмма претерпевает характерное искажение, вид которого на экране прибора зависит от степени раз-

вития преждевременного воспламенения накаливаемыми частями свечи зажигания (рис. 6.5 «б», 6.5 «в»).

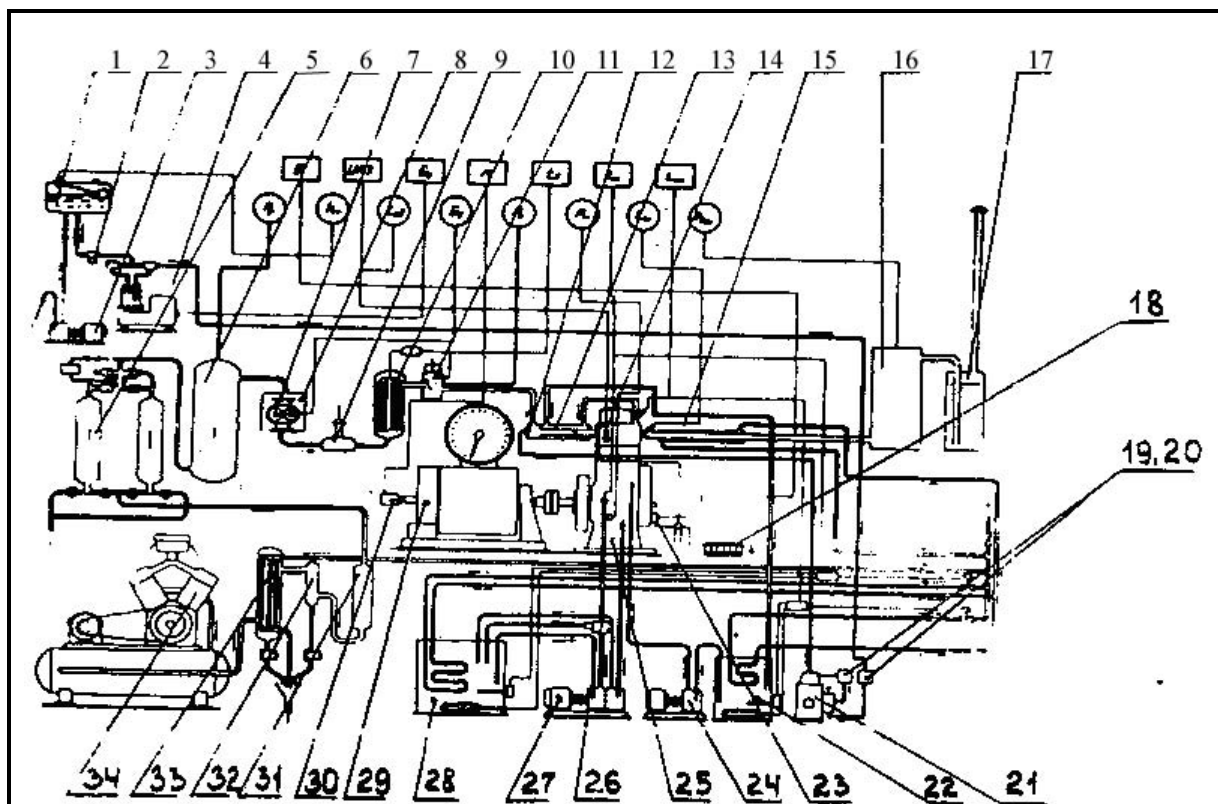
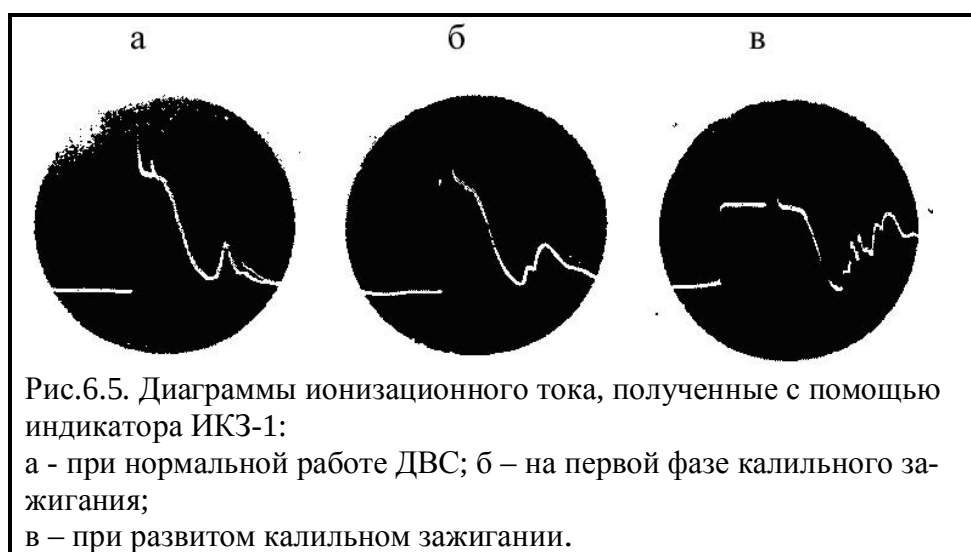


Рис. 6.3 Принципиальная схема установки для определения калильного числа свечи зажигания типа УВП-3.

1- топливный бак; 2- отстойник; 3- помпа; 4- расходомер РТ-3; 5- адсорбер; 6- ресивер; 7- газовый счетчик; 8- камера воздухомера; 9- регулятор давления; 10- воздухоподогреватель; 11- предохранительное устройство; 12-форсунка; 13-впускная труба; 14- свеча зажигания; 15- выпускная труба; 16- ресивер отработавших газов; 17- балансирный бачок; 18- аккумуляторная батарея; 19,20- фильтры тонкой и грубой очистки топлива; 21- топливный насос с подкачивающей помпой; 22- охлаждающий бачок; 23- прерыватель; 24- водяной насос; 25- двигатель; 26- блок масляных фильтров; 27- масляный насос; 28- масляный бачок; 29-динамометр; 30-тахометр; 31-фильтр; 32- водомаслоотделитель; 33- теплообменник; 34- компрессор.

Методика определения калильного числа свечи зажигания. До начала испытания ДВС прогревают согласно инструкции по эксплуатации установки со свечой зажигания, не предназначенной для испытаний. Затем свечу зажигания демонтируют и на ДВС установки устанавливают свечу, предназначенную для испытаний, предварительно проверенную на искрообразование и герметичность. Свечу зажигания ввертывают в предназначенную для нее вставку в головке цилиндра ДВС с приложением крутящего момента, указанного в ОСТ 37.003.081-98 для данного типоразмера свечи.



Испытание по определению калильного числа свечи зажигания проводят в следующем порядке:

- давление наддува повышают ступенчато, с шагом 80 мм рт.ст.;
- на каждой ступени нагрузки, путем изменения состава топливовоздушной смеси, устанавливают максимальную температуру газов в камере сгорания ДВС;
- на каждой ступени нагрузки в течение 3 мин. поддерживают установленный режим работы для стабилизации температуры свечи зажигания;

- процедуру ступенчатого повышения давления наддува (нагрузки ДВС)

продолжают до появления признаков калильного зажигания.

Признаком калильного зажигания при испытании с использованием установки типа «Labeco» (США) является появление быстрого и неуправляемого повышения температуры в камере сгорания ДВС. На установках типа УВП-3 при использовании «ионизационного» метода определения калильного зажигания признаком появления калильного зажигания является обнаружение ионизационным индикатором 6 – 10 самопроизвольных воспламенений в минуту.

При обнаружении калильного зажигания необходимо прекратить подачу топлива, давление наддува уменьшить на 5 кПа (0,05 кгс/см²), после чего подачу топлива вновь отрегулировать на максимальную температуру в камере сгорания. При повторном возникновении калильного зажигания нужно уменьшить давление наддува на 2,5 кПа, а при отсутствии калильного зажигания - повысить давление наддува на 2,5 кПа.

Расчет калильного числа осуществляют с использованием величины среднего индикаторного давления в цилиндре ДВС установки «Labeco» (США), определенной при стабильном режиме работы двигателя и при давлении наддува на 2,5 кПа, меньшем, чем при калильном зажигании. При использовании ионизационного индикатора (установки типа УВП), расчет величины калильного числа осуществляют с использованием величины среднего индикаторного давления, при котором в цилиндре ДВС за одну минуту происходило 6 – 10 самопроизвольных воспламенений.

Величину механических потерь P_m определяют по показанию динамометра при принудительном прокручивании ДВС на рабочей частоте вращения коленчатого вала и давлении наддува, равного атмосферному.

Калильное число свечи зажигания определяют как величину, численно равную среднему индикаторному давлению $p_{i,k}$, кгс/см², вычисляемому по формуле

$$p_{i,k} = Ak(p + p_m) \quad (6.1)$$

где: $p_{i,k}$ – среднее индикаторное давление, p – показание динамометра при работе двигателя на пороге калильного зажигания, p_m – показание динамометра при прокручивании двигателя для определения механических потерь, k – коэффициент, для пересчета размерностей величин, определяющих параметры ДВС и нагрузочного устройства (динамометра), а A – коэффициент пропорциональности, экспериментально установленный при определении калильного числа эталонных свечей зажигания на различных установках.

Примечание. При установлении несоответствия значений калильных чисел требованиям ОСТ 37.003.081-98 определяются его причины и разрабатываются мероприятия по их устранению.

Экспериментальное определение температуры свечи зажигания при работе на ДВС осуществляют с использованием термопар, встроенных в различные части свечи зажигания (свечей-термопар). При этом не только удастся определить режимы работы ДВС, на которых возникает калильное зажигание, установить причины его возникновения, но и определять недостатки в доводке двигателя, например, по разнице температур в отдельных цилиндрах можно выявить чрезмерное различие в них состава рабочей смеси. Это определяет эффективность применения свечей-термопар при подборе свечей зажигания к ДВС, так как обеспечивает возможность выявления и устранения его недостатков. Конструкция свечи зажигания с термопарой встроенной в кончик центрального электрода представлена на рис 6.7, а с термопарой в тепловом конусе изолятора – на рис 6.8. Технология изготовления свечей зажигания со встроенной термопарой приведена в главе 7, а ее внешний вид показан на рис. 6.6 (2).



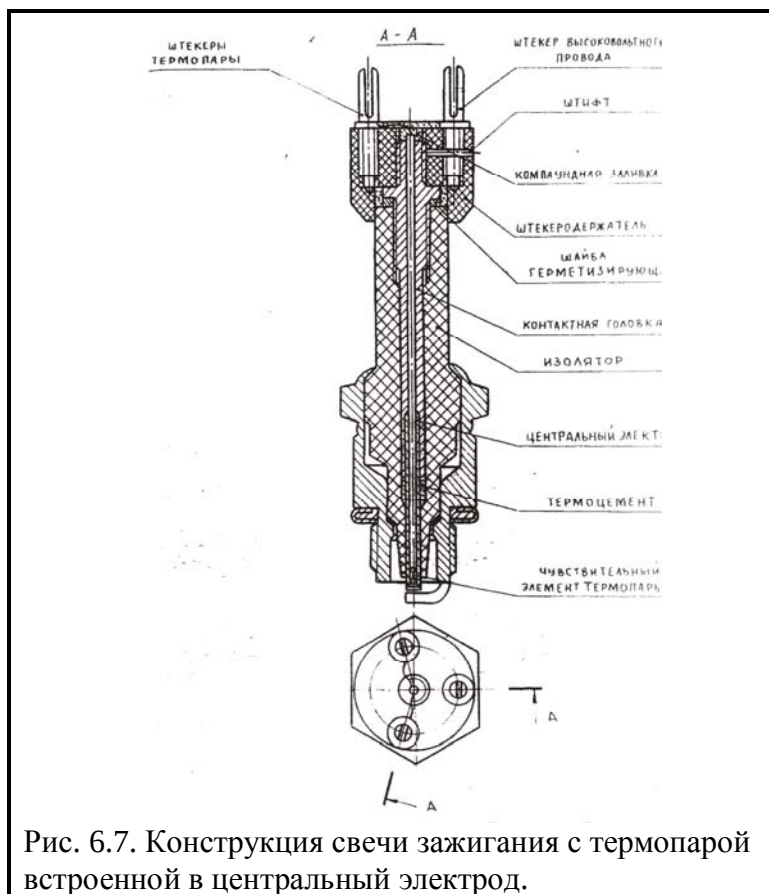


Рис. 6.7. Конструкция свечи зажигания с термопарой встроенной в центральный электрод.

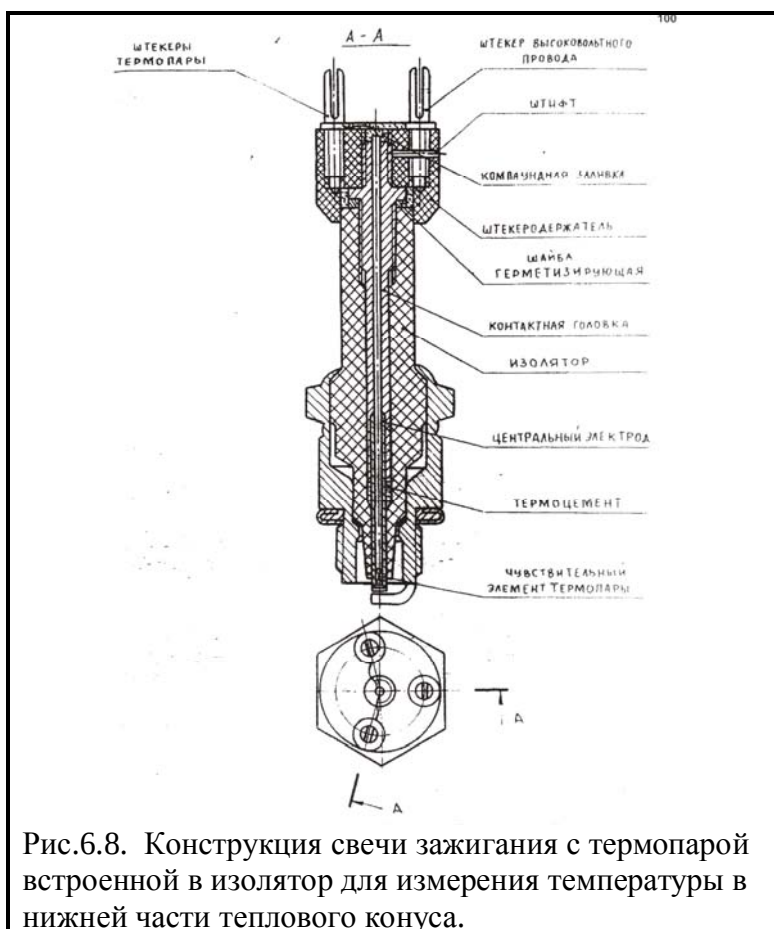


Рис.6.8. Конструкция свечи зажигания с термопарой встроенной в изолятор для измерения температуры в нижней части теплового конуса.

Глава 7. Производство свечей зажигания

Полный цикл основного производства_искровых свечей зажигания включает в себя:

- заготовительное производство и доработка сырьевых материалов, полученных от различных поставщиков;
- производство керамики (керамическое производство, включающее в себя кроме заготовительного отделения, приготовление керамической массы, ее обработка (формовка) и обжиг;
- металлическое производство, включающее в себя кроме заготовительного отделения, механообработку и прессовое производство;
- сборочное производство, включая сборку сердечника, корпуса и общую сборку свечи зажигания;
- контроль продукции на всех этапах производства (службу технического контроля).

7.1. Основные материалы для изготовления

Металлы для производства деталей свечи зажигания, должны отвечать следующим основным требованиям – высокая пластичность, допускающая обработку давлением в холодном состоянии, достаточная прочность, необходимая для проведения операций вытяжки и обеспечения требуемой жесткости корпуса, имеющего относительно тонкие стенки. Кроме того, они должны обеспечивать неизменяемость механических свойств со временем и стойкость против старения, достаточную антикоррозионную стойкость, необходимую в процессе изготовления, простоту термической обработки. Наиболее полно удовлетворяют перечисленным требованиям малоуглеродистые стали и некоторые цветные металлы (медь, алюминий, цинк и т.д.).

Обозначения сталей и сплавов, их компонентов, предусмотрено стандартами. Цифры, стоящие впереди марки стали, указывают среднее содержание углерода в десятых долях процента для высоколегированных сталей и сотых долях процента для низколегированных.

Цифры, стоящие после буквы, указывают на среднее содержание этого элемента в %. Если после буквы нет цифры, то среднее содержание элемента составляет около 1%. Буква "А", стоящая в конце марки, указывает на повышенное качество стали. Такая сталь имеет ограниченное содержание вредных примесей.

Пример: маркировка 1Х18Н9Т — нержавеющая сталь, содержит 0,1% углерода, 18 — хрома, 9 — никеля и до 1% титана.

Химический состав малоуглеродистых сталей, применяемых в производстве корпусов, уплотнительных колец, контактных головок, теплоотводящих шайб малого размера, экранов и других стальных деталей различного типа свечей зажигания приведен в таблице 7.1

Таблица 7.1

Марка стали	Основные элементы			Примеси, не более					
	С	Мп	Si	Сг	S	P		Ni	As
08КП	0,05... 0,11	0,25... 0,50	ДО 0,03	0,10	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08
10КП	0,07... 0,14	0,25... 0,50	0,07	0,15	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08
08ПС	0,05... 0,11	0,35... 0,65	0,05... 0,17	0,10	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08
10	0,07... 0,14	0,35... 0,65	0,17... 0,37	0,15	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08
08	0,05... 0,12	0,35... 0,65	0,17... 0,37	0,10	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08

Жаростойкие стали и сплавы, применяемые для изготовления центральных электродов и электродов массы, а также для оболочки биметаллических центральных электродов, сердечник которого, как правило, выполняют из чистой меди с содержанием меди 99,97% и допустимым содержанием кислорода 0,02%.

К жаростойким нержавеющим сплавам, применяемым для изготовления электродов, предъявляются следующие эксплуатационные требования: высокая жаростойкость, достаточная пластичность, допускающая обработку давлением

в холодном состоянии, достаточная крипоустойчивость, т. е. способность сохранять геометрические размеры и приданную форму в нагретом состоянии.

Для изготовления *центрального электрода* широко применяются сплавы Х15Н60-Н, Х20Н80-Н, Х15Н60, 13Х25Т-Э, химический состав которых представлен в таблице 7.2.

Таблица 7.2. Стали и сплавы, применяемые для производства центральных электродов

Марка сплава	Химический состав, %									
	C	Mn	S	P	Cr	Ni	Ti	Al	Si	Fe
Х15Н60-Н	0,06	0,6	0,015	0,02	15÷18	55÷61	0,2	0,2	1,0÷1,5	Ост.
Х20Н80-Н	0,06	0,6	0,015	0,02	20÷23	основа	0,2	0,2	1,0÷1,5	
Х15Н60	0,15	0,5	0,02	0,03	15÷18	55, ÷61	0,3	0,2	0,4÷1,5	
13Х25Т-Э	0,15	0,8	0,025	0,035	23÷27	0,6	0,2	—	1,0	

Для изготовления *электрода массы* широко применяются сплавы на основе никеля – НМЦ5 и НМЦ2,5 (см. табл. 7.3).

Обозначение легирующих элементов применяемых для изготовления жаростойких и нержавеющей сталей и сплавов представлено в таблице 7.4.

Таблица 7.3. Сплавы, применяемые для производства электродов массы

Марка сплава	Основные компоненты, %			Примеси, %, не более								
	Mn	Ni	Co	Fe	Si	Mg	Cu	Re	C	S	P	Bi
НМЦ5	4,6	ост.	0,5	0,65	0,3	0,1	0,2	0,002	0,15	0,03	0,01	0,02
НМЦ 2,5	2,3	ост.	0,5	0,4	0,3	0,1	0,2	0,002	0,1	0,03	0,02	0,02

Таблица 7.4. Обозначение легирующих элементов

Название химического элемента	Обозначение химического элемента	Обозначение химического элемента при маркировке стали	Название химического элемента	Обозначение химического элемента	Обозначение химического элемента при маркировке стали
Марганец	Mn	Г	Алюминий	Al	Ю
Кремний	Si	С	Титан	Ti	Т
Хром	Cr	Х	Ниобий	Nb	Б
Никель	Ni	Н	Ванадий	V	Ф
Молибден	Mo	М	Кобальт	Co	К
Вольфрам	W	В	Медь	Cu	Д

К электроду массы, кроме перечисленных требований, предъявляется требование хорошей свариваемости с конструкционными сталями, из которых изготавливают корпус. Этому свойству наиболее полно удовлетворяет сплавы на основе никеля, в частности НМЦ-5. При выборе замены сплавов для бокового электрода нужно руководствоваться тем, что большое влияние на свариваемость оказывает наличие в сплаве различных легирующих примесей.

Хром — содержание его до 0,9% не влияет на свариваемость. При содержании хрома от 9% до 35% свариваемость резко снижается, т. к. окисляясь, он образует тугоплавкие оксиды Cr_2O_3 , которые резко повышают твердость в зоне термического влияния, образуя карбиды хрома, а также способствуют возникновению закалочных структур, хром способствует образованию трещин в месте сварки.

Никель — при содержании в сплавах от 0,3% до 35% способствует измельчению кристаллических зерен, повышению пластичности и прочности, не снижает свариваемости.

Ванадий — содержится в легированных сплавах от 0,2% до 1,5%. Придает сплаву высокую прочность, снижает свариваемость деталей.

Вольфрам — содержится в легированных сталях от 0,8% до 18%. Снижает свариваемость стали в процессе сварки, легко окисляется и выгорает.

Титан — содержится в легированных сталях от 0,5...1,0%. Титан повышает сварочные свойства.

Углерод — содержание углерода в стали до 0,25% не ухудшает свариваемости. При большем содержании углерода сварка ухудшается.

Марганец — содержится в сплавах в пределах от 0,3% до 0,8%, процесс сварки не затрудняет. При содержании в сплавах до 15% марганец повышает закаливаемость стали и улучшает ее механические свойства.

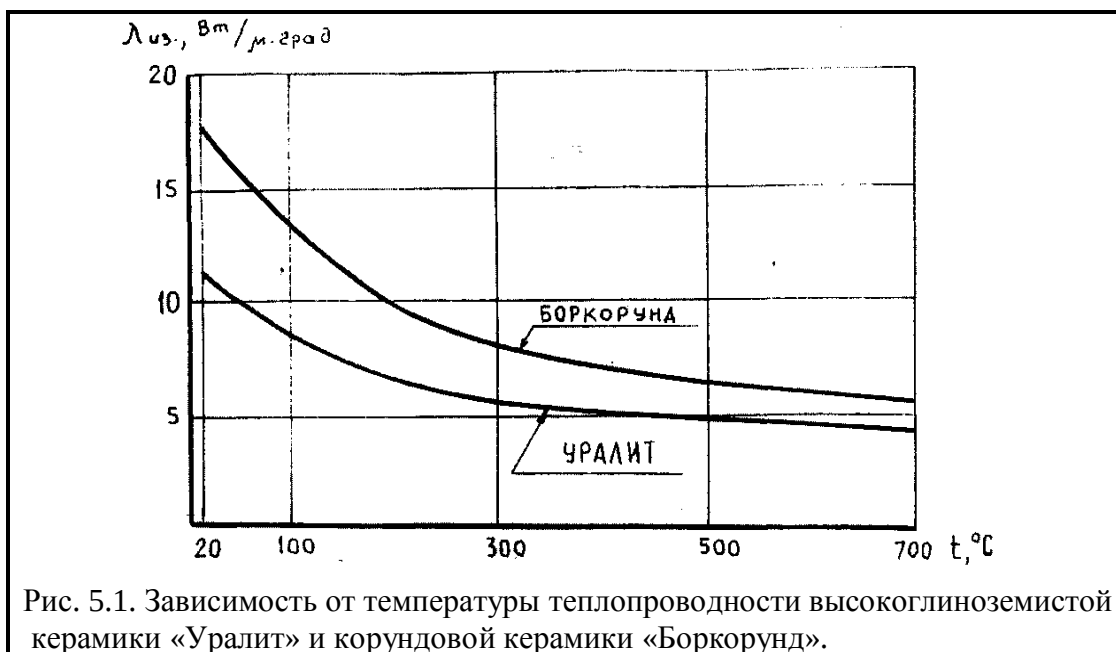
Кремний — находится в сплавах в пределах от 0,02% до 1,5%. Условия сварки ухудшает.

Материалы для производства изоляторов. Для производства изоляторов свечей зажигания в настоящее время используется исключительно корундовая

керамика, названная в соответствии с наименованием природного материала, минерала корунда, представляющего собой чистый диоксид алюминия – Al_2O_3 . Так, как полностью синтетическая техническая керамика содержит не только диоксид алюминия, но и другие необходимые легирующие добавки и неизбежные примеси, корундовой принято называть такую керамику, что содержит 95% и более Al_2O_3 . В качестве добавок и примесей могут быть различные окислы – SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , B_2O_3 и т.д., а также щелочи. Корундовая керамика, производимая различными предприятиями в бывшем СССР, и используемая для изготовления изоляторов свечей зажигания, имела различные наименования: «Боркорунд», «Хилумин», «Синоксаль» и другие. Особняком стоит высокоглиноземистый керамический материал «Уралит», содержащий примерно 75% Al_2O_3 . Для производства «Уралита» в основном используется природный материал – глина, добываемая в Бускульском месторождении на Урале, откуда и название этой керамики. В настоящее время изоляторы из «Уралита» для свечей зажигания сняты с производства, хотя практически до конца XX века объем их производства составлял до $\frac{3}{4}$ от общего производства изоляторов.

Применение корундовой керамики для изготовления изоляторов свечей зажигания обусловлено тем, что она обладает высокими механическими прочностными свойствами, которые сохраняются даже при нагреве до 1500-1600 С, хорошими электрофизическими свойствами, отличной химической стойкостью и достаточной теплопроводностью в диапазоне температур от 100 С до 700 С (рис. 5.1).

Для исключения потери энергии, связанной с утечкой электрического тока по поверхности изолятора, выступающую из корпуса в подкапотное пространство автомобиля часть изолятора покрывают специальной стеклянной глазурью.



Требования к изоляторам изложены в ОСТ 37.003.036-87 «Изоляторы керамические для искровых свечей зажигания. Технические условия».

Материалы, применяемые для приготовления стеклогерметика.

Для герметизации сердечников свечей зажигания используется стеклогерметик, изготавливаемый из стекольной фритты (гранулята стекла), состав которой приведен в табл. 7.5, с добавлением медного порошка или алюминиевой пудры.

Таблица 7.5. Химический состав стекольной фритты

Наименование оксидов, входящих в состав стекольной фритты	Нормальное содержание оксидов, %	
	С-1	С-2
Оксид кремния	65,5±1,0	66,0±1,0
Оксид алюминия	2,2±0,5	2,2±0,8
Оксид бора	24,1±2,0	22,2±2,0
Оксид калия	4,1±1,0	3,8±1,0
Оксид кальция	—	0,3±0,1
Оксид свинца	—	0,2±0,1
Оксид железа	—	не более 0,2

Основные требования к стекольной фритте: температура размягчения 510°C, коэффициент линейного термического расширения должен быть близок к коэффициенту расширения керамики, чтобы избежать растрескивания керамики при высоких температурах.

Сборка сердечника. Сборку сердечника (изолятора в сборе с центральным электродом и контактным стержнем) осуществляют в следующем порядке. Электрод устанавливают в канале изолятора и сверху засыпают порошкообразный стеклогерметик или укладывают его в виде таблетки. Затем в канал изолятора устанавливают контактную головку. До запрессовки стеклогерметик занимает больший объем, чем после этой операции и контактный стержень не может полностью войти в канал изолятора. Он примерно на треть длины выступает над изолятором. Заготовку нагревают до температуры 700-900 С и с усилием в несколько десятков килограммов контактный стержень вдавливают в размягченный под воздействием температуры стеклогерметик. При этом он затекает в зазоры между каналом изолятора, головкой центрального электрода и контактной головкой. После остывания стеклогерметик затвердевает и надежно закрепляет обе эти детали в канале изолятора. Между торцами электрода и контактной головки образуется герметизирующая пробка высотой от 1,5 до 7,0 мм, полностью перекрывающая канал изолятора от прорыва газов. Большая высота таблетки соответствует свечам зажигания со встроенным помехоподавительным резистором.

В случае необходимости встроить в цепь центрального электрода электрическое сопротивление для подавления электромагнитных помех применяют резистивный стеклогерметик. После остывания герметизирующая пробка приобретает электрическое сопротивление необходимой величины.

7.2. Производство изоляторов и металлодеталей

Технология изостатического прессования. В настоящее время в массовом производстве наиболее распространена технология изготовления изоляторов свечей зажигания, основанная на методе изостатического прессования «сырой» заготовки из порошкообразной массы. Такой технологический процесс состоит из следующих основных этапов:

- предварительный обжиг основного сырья – глинозема (порошкообразного корунда) с целью стабилизации его свойств;
- приготовление шликера (сметанообразной керамической массы) с помощью пластификаторов и различных добавок, смешанных со стабилизированным глиноземом;
- приготовление из готового шликера в распылительной сушилке пластичного порошка для дальнейшего прессования заготовки изолятора свечи зажигания;
- изостатическое прессование заготовки и ее механическая обработка для придания необходимой формы и размеров, увеличенных по сравнению с готовым (обожженным) изолятором с учетом усадки (до 12%), неизбежной при окончательном обжиге;
- окончательный обжиг в туннельной печи при температуре свыше 1600 С.
- нанесение на выступающую из корпуса часть изолятора порошкообразной глазури и ее обжиг в специальной туннельной печи при температуре менее 900 С; в современном производстве при этом одновременно закрепляют предварительно нанесенное на или под глазурь клеймо – чаще всего это наименование производителя или его товарный знак и условное обозначение типа свечи зажигания; кроме того, в той же печи осуществляют разогрев стеклогерметика перед операцией «запрессовка контактной головки в изолятор»;
- контроль готовой продукции – изолятора или сердечника (изолятора с центральным электродом и контактной головкой в сборе; в применении случае резистивного стеклогерметика контролю подлежит и электрическое сопротивление цепи центрального электрода – величина встроенного сопротивления).

Технология горячего литья под давлением. Для изоляторов сложной конфигурации и в экспериментальном производстве используется технология изготовления изоляторов свечей зажигания методом горячего литья из шликера, полученного примерно также как при использовании технологии изостатического прессования. При этом шликер делают менее вязким для улучшения заполнения

мости им металлической формы, которая может быть одноместной и многоместной. На аппарате для шликерного литья отливают под давлением заготовку уже с формой изолятора и не требующую механической обработки но с размерами, уступающими усадку при обжиге. Усадка размеров изоляторов, сырая заготовка которых получена методом горячего литья под давлением больше, чем у заготовки полученной методом изостатического прессования с последующей механической обработкой. Это объясняется несколько большим количеством связки, что необходимо для придания достаточной текучести шликеру, предназначенному для горячего литья под давлением. Кроме того, при этом методе получения заготовки обжиг изолятора приходится проводить в два этапа: предварительный выжиг связки при температуре чуть ниже 1000 С, а затем окончательный – при температуре 1600-1700 С.

Технология изготовления корпуса свечи зажигания. В настоящее время в массовом производстве наиболее распространен метод холодной штамповки корпуса из прутка круглого сечения. В бывшем СССР широко применялись различные технологии штамповки корпусов из листового металла, в частности штамповка из горячекатаного стального листа и из трубки необходимого диаметра. Технология штамповки корпуса свечи зажигания из стального листа с использованием автоматической роторной линии до начала XXI века применялась на ПО УМЗ (г. Ульяновск) [22].

Технология изготовления металлических деталей (кроме корпуса). Контактную головку и монометаллический центральный электрод штампуют на пресс-автоматах; уплотнительное кольцо изготавливают известными методами листовой штамповки; теплоотводящую шайбу вырубают из листа металла (меди или мягкой стали). Контактную гайку или получают механической обработкой прутка алюминия, или отливают из сплавов на основе цинка или из латуни.

После изготовления металлических деталей их покрывают защитным или защитно-декоративным покрытием – металлическим (цинковым, никелевым) или окисным.

5.3. Сборочное производство

Сборка сердечника. Сборку сердечника (изолятора в сборе с центральным электродом и контактным стержнем) осуществляют в следующем порядке. Электрод устанавливают в канале изолятора и сверху засыпают порошкообразный стеклогерметик или укладывают его в виде таблетки. Затем в канал изолятора устанавливают контактную головку. До запрессовки стеклогерметик занимает больший объем, чем после этой операции и контактный стержень не может полностью войти в канал изолятора. Он примерно на треть длины выступает над изолятором. Заготовку нагревают до температуры 700-900 С и с усилием в несколько десятков килограммов контактный стержень вдавливают в размягченный под воздействием температуры стеклогерметик. При этом он затекает в зазоры между каналом изолятора, головкой центрального электрода и контактной головкой. После остывания стеклогерметик затвердевает и надежно закрепляет обе эти детали в канале изолятора. Между торцами электрода и контактной головки образуется герметизирующая пробка высотой от 1,5 до 7,0 мм, полностью перекрывающая канал изолятора от прорыва газов. Большая высота таблетки соответствует свечам зажигания со встроенным помехоподавительным резистором.

В случае необходимости встроить в цепь центрального электрода электрическое сопротивление для подавления электромагнитных помех применяют резистивный стеклогерметик. После остывания герметизирующая пробка приобретает электрическое сопротивление необходимой величины.

Сборка корпуса. Боковой электрод массы прямоугольного сечения приваривают к торцу корпуса, подгибают примерно под углом 45° в сторону центрального и догибают в окончательное положение при окончательной сборке свечи зажигания.

Сборка сердечника с корпусом. Сердечник устанавливают в корпусе свечи зажигания так, что он соприкасается своей конической поверхностью с соответствующей поверхностью внутри корпуса. Между этими поверхностями устанавливают герметизирующую «теплоотводящую» шайбу (медную или

стальную). Закрепление сердечника осуществляют завальцовкой буртика корпуса на поясok изолятора. Герметизацию по соединению изолятор – корпус осуществляют методом осадки корпуса в нагретом состоянии (термоосадкой).

Окончательная сборка свечи зажигания. В массовом производстве используют специальный многопозиционный сборочный автомат с роторной или линейной подачей узлов и деталей. Сердечник устанавливают в корпусе свечи зажигания так, что он соприкасается своей конической поверхностью с соответствующей поверхностью внутри корпуса. Между этими поверхностями устанавливают герметизирующую «теплоотводящую» шайбу (медную или стальную). Закрепление сердечника осуществляют завальцовкой буртика корпуса на поясok изолятора. Герметизацию по соединению изолятор – корпус осуществляют методом осадки корпуса в нагретом состоянии (термоосадкой).

На резьбовую часть контактного стержня устанавливают контактную гайку, если это требуется конструкцией наконечника высоковольтного провода. В некоторых свечах контактный стержень не имеет резьбовой головки, она сразу же штампуется в форме контактной гайки.

На цоколь корпуса с упором в плоскую опорную поверхность устанавливают уплотнительное кольцо, предназначенное для герметизации соединения свеча – двигатель.

Гарантии изготовителя. Изготовитель обязан гарантировать соответствие свечей зажигания требованиям ОСТ 37.003.081-98 при соблюдении потребителями условий эксплуатации, монтажа, транспортирования и хранения, установленных стандартом.

- Гарантийный срок эксплуатации свечей зажигания - 18 месяцев при наработке не более предусмотренной стандартом (см. выше);
- Гарантийный срок хранения свечей зажигания, поставляемых в запасные части - 3 года, для рыночной торговли - 1 год.

5.4. Изготовление свечей–термопар

Свеча зажигания с термопарой в изоляторе. При изготовлении свечей – термопар изолятор изготавливают методом горячего литья под давлением. Это существенно упрощает технологию выполнения в изоляторе каналов для вывода проводов термопары, а также углублений для размещения ее горячего спая. При этом каналы оформляют с помощью капроновых нитей диаметром 0,8 мм, натянутых в литевой односторонней форме, а углубления - с помощью штифтов диаметром 0,9 мм, ввернутых в корпус литевой формы. После отливки изолятора нити извлекают, а штифты вывертывают из корпуса формы. Для прокладки проводов термопар на поверхности теплового конуса отлитого «сырого» изолятора прорезались канавки глубиной 0,5 мм.. После обжига изолятора и операции по закреплению глазури, производится установка в него термопары. "Шарик" горячего спая диаметром около 1 мм, укладывают в готовое углубление, а провода - в канавки. Затем их закрепляют затворенным на жидком стекле термоцементом с последующей зачисткой поверхности изолятора с целью удаления излишков термоцемента. Концы проводов термопары, заключенные в стеклянную изоляцию, выводят на клеммодержатель. Клеммодержатель, предназначенный для крепления выводов термопары и компенсационных проводов, навинчивают на резьбовую часть контактной головки. Его габаритные размеры позволяют производить монтаж свечи на двигатель с помощью стандартного удлиненного ключа с размером 21 мм. Клеммодержатель изготавливают из текстолита, обеспечивая при этом надежную изоляцию выводов термопары от пробоя на контактную головку свечи зажигания высоковольтным импульсом системы зажигания.

При сборке свечей-термопар применяют клеевую герметизацию центрального электрода с применением высокотемпературного компаунда ВК-Z в термостате при температуре 150°C.

Места выводов термопар на цилиндрическую часть изолятора и тепловой конус герметизируют следующим образом. Термопару вставляют в канал так, чтобы ее «горячий спай» выступал на 10-20 мм от посадочного места в изоля-

торе. Канал плотно набивают термоцементом. После этого термопару втягивают в канал до тех пор, пока ее «горячий спай» не оказывается в углублении, где он должен быть заделан. Затем каналы и места выводов замазывают заподлицо с поверхностями изолятора термоцементом и выдерживают одни сутки. Далее изоляторы помещают в печь, где их нагревают до температуры 830 ± 10 С. Скорость подъема температуры не должна превышать 100С в течение каждого часа нагрева. После такой термообработки изоляторы охлаждают вместе с печью. Предварительную тарировку свечи-термопары производят в муфельной печи в диапазоне температур от 100 С до 1100 С.

Свеча зажигания с термопарой в центральном электроде. При изготовлении свечей зажигания с термопарой, заделанной в конец центрального электрода, для крепления контактной головки, в верхней части канала изолятора выполняют специальную резьбу. Центральный электрод изготавливают из стальной бесшовной холоднодеформированной трубки (материал – сталь 1Х18Н10Т) с наружным диаметром 2.5 мм и толщиной стенки 0.5 мм. Контактная головка и центральный электрод спаивают с использованием серебряного припоя в кондукторе, обеспечивающем получение заданного размера от торца центрального электрода до нижнего торца буртика контактной головки. Для изготовления термопары используют кабель КТМС градуировки ХА с наружным диаметром оболочки 1,5 мм при диаметре жил 0,3 мм. Кабель состоит из хромелевой и алюмелевой жил, заключенных в стальную оболочку и электрически изолированных между собой и оболочкой при помощи минеральной засыпки из периклаза.

При изготовлении термопары свободные концы термоэлектродных жил кабеля освобождают от оболочки и изоляции. Жилы одного из концов кабеля скручивают между собой, и сваривают аргонно-дуговой сваркой, образуя «горячий спай» термопары диаметром примерно 1 мм. Торцев центрального электрода СЗ сваривают с горячим спаем термопары тем же способом. Инерционность термопары определяют путем погружения ее рабочего конца в расплавленный свинец. При этом время стабилизации показаний милливольтметра,

присоединенного к термопаре, составляет менее 10 с, что соответствует необходимым требованиям.

С целью обеспечения хорошего теплоотвода от центрального электрода, канал изолятора заполняют термоцементом (цемент марки "500" по ГОСТ 969-75, замешанный на жидком натриевом стекле по ТУ МХП № 1607-47), после чего контактную головку в сборе с центральным электродом ввертывают в канал изолятора. При этом происходит деформация алюминиевой шайбы, установленной под буртиком контактной головки, то обеспечивает герметичность соединения центральный электрод-изолятор. После этого производят сушку термоцемента при температуре 1100°C.

Герметизацию свечи зажигания по соединению изолятор - корпус производят с использованием метода электротермической осадки корпуса.

На контактную головку, покрытую эпоксидной смолой (компаунд У-153 по ТУ 6-05-1584-72) с отвердителем - полиэтиленамином по ТУ 6-02-1599-75 в соотношении 10:1, навертывают текстолитовый штекеродержатель со штекерами, к которым припаивают жилы термопары.

Штекер высоковольтного провода соединяют с контактной головкой при помощи стального штифта. Верхнюю часть штекеродержателя покрывают эпоксидной смолой с отвердителем, с целью защиты жил термопары от механических повреждений.

Герметичность соединения свечи-термопары с головкой ДВС обеспечивают применением стандартного уплотнительного кольца.

Изготовленные образцы свечей-термопар проверяют на герметичность соединений и бесперебойность искрообразования по ОСТ 37.003.081-98.

Глава 8. Эксплуатация свечей зажигания

8.1. Хранение и использование свечей зажигания

Порядок использования свечей установлен стандартами, техническими условиями, инструкциями по эксплуатации и другой технической документацией. В процессе эксплуатации необходимо проводить ТО и плановую замену свечей выработавших ресурс. Кроме того, возникает необходимость в диагностике отказов и проверке работоспособности свечи зажигания. В соответствии с ОСТ 37.003.081-98 изготовитель свечи зажигания обеспечивает гарантии при соблюдении потребителем условий эксплуатации, монтажа, транспортирования и хранения, указанных в стандарте. Свечи зажигания следует устанавливать только на те, ДВС, для которых они предназначены. Стандартом установлен следующий порядок хранения и использования свечей зажигания:

- Если новые свечи зажигания покрыты консервационной смазкой, их необходимо протереть и промыть в растворителе (бензине), а затем просушить. Свечи зажигания в густой консервационной смазке можно прокипятить в воде и полностью просушить.
- Перед монтажом свечи зажигания на ДВС необходимо проверить комплектность, очистить загрязненные поверхности и отрегулировать искровой зазор. Наличие загрязнений и масел в рабочей камере, на тепловом конусе изолятора и в искровом зазоре недопустимо.
- Во время работы свечи необходимо предохранять от ударов и попадания на них влаги.
- При проведении ТО двигателя следует очищать свечи от нагара и производить регулировку искрового зазора.
- Транспортировать свечи зажигания можно только в закрытом транспорте при условии исключения возможности попадания на них атмосферных осадков.
- Хранить свечи зажигания можно только в помещении в упаковке изготовителя.

В процессе работы на ДВС под воздействием искрового разряда, пламени и раскаленных газов электроды свечи изнашиваются. Когда искровой зазор возрастает до предельно допустимой для данной системы зажигания величины, начинаются перебои в искрообразовании.

Кроме того, свеча зажигания постепенно покрывается продуктами, образующимися в процессе работы двигателя и оседающих на тепловом конусе изолятора и электродах. Тонкий слой налета светло-серого или светло-коричневого цвета свидетельствует о том, что ДВС находится в технически исправном состоянии и свеча соответствует ему по тепловой характеристике. При этом расход топлива, моторного масла и токсичность отработавших газов соответствуют действующим нормам. В связи с неизбежным износом и легким загрязнением свечи, в качестве предупредительной меры, с определенной периодичностью необходимо проводить ТО, которое заключается в регулировке искрового зазора и очистке от нагара.

Долговечность свечи зависит от многих факторов, и прежде всего от условий применения. На двухтактном двигателе спортивного мотоцикла в условиях соревнований свеча может выработать свой ресурс всего за несколько часов. На тихоходном двигателе, например передвижной электростанции, свечи могут работать тысячу часов и более.

На современном автомобиле, даже с мощной электронной системой зажигания, в условиях рядовой эксплуатации износ искрового зазора происходит со скоростью не более 0,015 мм за 1000 км. пробега автомобиля. При установочном зазоре 1,0 мм и предельно допустимом 1,3 мм припуск на износ электродов равен 0,3 мм. При указанной выше скорости износа расчетный ресурс свечи до регулировки составляет 20 тыс. км. При классической системе зажигания расчетный ресурс примерно на треть больше.

Реальная долговечность свечей в 2-3 раза больше, так как увеличившийся зазор можно отрегулировать, а нагар удалить. Но многие производители автомобилей не хотят рисковать и рекомендуют заменять свечи при электронной

системе зажигания через каждые 20 тыс. км, а при классической — через каждые 30 тыс. км.

На других ДВС, кроме автомобильных, устанавливают свою периодичность обслуживания, измеряемую либо в километрах пробега, либо в моточасах.

8.2. Определение причин отказов.

Отказом в работе свечи зажигания считают частичное или полное прекращение искрообразования в искровом зазоре. Отказы наступившие в гарантийный период или между ТО, установленными в инструкции по эксплуатации, считают преждевременными. Наиболее вероятны отказы свечей из-за образования на поверхности теплового конуса изолятора токопроводящего нагара в количестве, приводящем к перебоям в искрообразовании. Возможны различные повреждения свечи в результате аномальной работы двигателя.

Значительно реже происходят отказы из-за нарушений правил эксплуатации: применение свечей неправильно укомплектованных, не соответствующих по характеристикам и размерам двигателю в процессе эксплуатации, закоксовывание зазора и даже рабочей камеры в результате плохой очистки от смазки и грязи перед установкой.

Встречаются случаи повреждения свечи при монтаже и демонтаже: поломка головки изолятора, повреждения корпуса и срыв резьбы. Если при установке даже слегка ударить свечу о твердую поверхность, боковой электрод может погнуться и искровой зазор уменьшится, что впоследствии приведет к отказу.

Кроме того, возможны отказы из-за производственных дефектов, не выявленных перед установкой на двигатель: трещины на изоляторе, отсутствие герметичности и некачественное закрепление электродов.

Отдельные пропуски в искрообразовании можно определить только на СТО с использованием необходимого диагностического оборудования. Более доступной может быть обычная проверка токсичности выхлопа. При увели-

ченном содержании токсичных компонентов, особенно углеводородов, есть основание полагать, что имеются пропуски в искрообразовании. Если своевременно не обнаружить и не устранить причину пропуски нарастают, что приводит к ухудшению пуска и неустойчивой работе двигателя, особенно заметной на холостом ходу. В этом случае момент выявления дефекта определяется квалификацией и внимательностью водителя. Крайний случай – полный отказ при пуске двигателя, особенно вероятный в холодное время года.

Чтобы убедиться в том, что нарушено бесперебойное искрообразование свечи не снимая их с двигателя, можно воспользоваться искровым пьезоэлектрическим пробником «ТЕСТ-М» 120.338.002.ТУ производства ООО «Аврора» (рис. 8.1).

При определенном навыке с помощью пробника можно определить отказавшие из-за нагара свечи, не снимая их с двигателя. Проверка проводится в следующем порядке:

- снять со свечи наконечник с высоковольтным проводом и на его место установить наконечник высоковольтного провода пробника;
- подпружиненный контакт пробника прижать к массе двигателя;
- несколько раз нажать и отпустить клавишу пробника.

Вспышки лампы при нажатии свидетельствуют о наличии искрообразования. Отсутствие вспышек при нажатии свидетельствует о прекращении искрообразования. В этом случае свечу необходимо демонтировать и оценить ее техническое состояние. Затем свечу очищают от нагара и снова проверяют ее работоспособность.



Рис. 8.1. Искровой пьезоэлектрический пробник «ТЕСТ-М»

На двигателях с классической системой зажигания некоторые бывалые водители советовали делать проверку путем последовательного снятия наконечников с высоковольтным проводом со свечей на работающем двигателе. При отключении работоспособной свечи у двигателя уменьшаются обороты, при отключении отказавшей его работа не изменяется. Такая проверка небезопасна, а на двигателях с электронными системами зажигания категорически запрещена, так как может привести к дорогостоящему ремонту электронных блоков.

8.3. Снятие и установка свечи зажигания.

Демонтаж свечи с двигателя осуществляют в следующем порядке:

- Снять наконечник провода высокого напряжения, при этом нельзя тянуть за провод.
- Поверхность в углублении головки цилиндра вокруг свечи очистить сжатым воздухом или кисточкой, чтобы частицы грязи не попали в цилиндр и только после этого свечу вывернуть.

- После снятия необходимо проверить наличие уплотнительного кольца на цоколе корпуса свечи. В некоторых случаях при демонтаже уплотнительное кольцо может остаться на двигателе.

- Провести тщательный осмотр, особое внимание обратить на изолятор (нет ли механических повреждений), рабочую камеру и электроды. Проверить, нет ли мостика в искровом зазоре, иногда он бывает малозаметен.

Монтаж свечи на двигатель осуществляют в следующем порядке:

- Внимательно осмотреть свечу, нет ли механических повреждений, проверить наличие уплотнительного кольца и контактной гайки (если она нужна). По маркировке проверить соответствие свечи двигателю, на который она устанавливается.

- Проверить и при необходимости отрегулировать величину искрового зазора на величину, указанную в инструкции по эксплуатации двигателя.

- От руки завернуть свечу до упора и затянуть специальным свечным ключом с усилием, указанным в инструкции по эксплуатации. Для свечей с резьбой М14х1,25 и плоской опорной поверхностью рекомендуемое усилие затяжки не более 3 кгсм.

Резьбу перед установкой не следует покрывать графитом или каким-нибудь другим смазочным материалом. Слишком сильная затяжка свечи может привести к разрушению резьбы, деформации корпуса или к потере герметичности. Свечи зажигания с плоской опорной поверхностью должны устанавливаться на ДВС с алюминиевой головкой цилиндра с приложением усилия от 20 до 30 Нм, а с чугунной или стальной головкой – с приложением усилия от 20 до 40 Нм. Свечи зажигания с коническим посадочным местом должны устанавливаться на ДВС с алюминиевой, чугунной или стальной головкой с приложением усилия от 10 до 20 Нм.

Не допускается устанавливать свечу без уплотнительного кольца или с двумя уплотнительными кольцами. Это приведет к нарушению герметичности соединения свеча с головкой блока цилиндров. Если резьба длинна, то свеча слишком выступает в камеру сгорания, что может привести к ее перегреву. Вы-

ступающие витки резьбы на корпусе покроются нагаром и при попытке демонтажа возможно повреждение резьбы.

Если резьба коротка, то свеча недостаточно выступает в камеру сгорания. Это ухудшит воспламенение горючей смеси, нижние витки резьбы головки блока цилиндров покроются нагаром и установить свечу с более длинной резьбовой частью будет затруднительно. Некоторые водители применяют свечи с укороченной резьбовой частью с целью перехода на более низкооктановое топливо. Это заблуждение, т.к. степень сжатия при этом практически не меняется.

Регулировка зазора. Величина искрового зазора должна быть соблюдена с точностью 0,10-0,15 мм. На новой свече зажигания эту величину можно измерить обычным пластинчатым щупом. Но в процессе эксплуатации электроды изнашиваются неравномерно. Рабочий торец центрального электрода постепенно приобретает сферическую форму. В боковом электроде образуется серповидная выемка. В этом случае точное измерение зазора возможно только специальными щупами. Рабочие части таких щупов выполнены в виде проводочек необходимого диаметра.

Регулировку зазора можно осуществлять только подгибкой бокового электрода. При любой попытке воздействовать на центральный электрод легко повредить изолятор и свеча станет полностью непригодна. Подгибку электрода можно осуществить с помощью прорезей в специальном щупе, входящем в комплект инструмента водителя. Допускается уменьшать зазор слегка ударяя боковым электродом о твердую поверхность. Увеличивать зазор можно с помощью тонкой пластины, небольшой отвертки или ножа. Расстояние между электродами отрегулировано правильно, если соответствующая пластина специального щупа проходит между электродами с едва ощутимым сопротивлением.

8.3. Оценка состояния свечи зажигания и определение технического состояния ДВС по виду рабочей части свечи зажигания

В процессе эксплуатации возможны различные механические и термические повреждения изолятора и металлических деталей.

Демонтированные свечи следует сразу же очищать, но сначала надо оценить их внешний вид. По внешнему виду свечей можно судить не только о том, были ли они слишком горячими или слишком холодными, но и о возможных неисправностях двигателя. По нагару на тепловом конусе изолятора, стенках рабочей камеры и электродах можно сделать заключение о правильности регулировок системы топливоподачи и угла опережения зажигания.

Таблица. 8.2. Определение технического состояния ДВС по виду рабочей части свечи зажигания.

Вид нагара		Возможная причина	Сопутствующий признак	Способ устранения
1		2	3	4
	Тонкий слой светло-серого или светло-коричневого налета.	Двигатель в исправном состоянии, свеча соответствует по тепловой характеристике (калильному числу).	Расход топлива, моторного масла и токсичность ОГ соответствуют нормам.	Очистить свечи от налета и при необходимости отрегулировать искровой зазор.
	Матовая черная копоть.	Неправильная регулировка карбюратора или угла опережения зажигания. Низкая компрессия, негерметичность клапанов или износ цилиндров. Загрязнения воздушного фильтра. Неправильная установка искрового зазора. Трещина в изоляторе. Свеча «холодна» для данного двигателя	Повышенный расход топлива, снижение мощности, неустойчивая работа ДВС на холостом ходу, затруднен пуск.	Отрегулировать систему питания и зажигания. Отремонтировать двигатель. Заменить воздушный фильтр. Отрегулировать искровой зазор. Заменить свечу. Заменить свечу на более «горячую».

Продолжение таблицы 8.2.

1		2	3	4
	Блестящий черный маслянистый нагар.	Попадание масла в камеру сгорания.	Повышенный расход масла, неустойчивая работа ДВС на холостом ходу, затруднен пуск.	Заменить масляные кольца впускных клапанов или поршневые кольца.
	Толстый слой рыхлых отложений.	Низкое качество бензина или моторного масла.	Перебои в работе ДВС, затруднен пуск.	Заменить топливо или моторное масло, промыть систему смазки.
	Отложения красного цвета.	Ненормированное применение железосодержащих присадок в бензине.	Перебои в работе ДВС, затруднен пуск.	Заменить топливо.
	Оплавление, выгорание электродов, трещина на тепловом конусе изолятора или его разрушение.	Свеча «горяча» для данного двигателя.	Перебои в работе ДВС, затруднен пуск.	Заменить свечу на соответствующую.
		Неисправность системы охлаждения.	Перегрев двигателя.	Устранить неисправность системы охлаждения.
		Велик угол опережения зажигания.	Перегрев ДВС, детонация.	Отрегулировать угол опережения зажигания.
		Применение низкооктанового топлива.	Перегрев ДВС, детонация.	Заменить топливо.

По нагару также можно сделать заключение об исправности приборов системы охлаждения и даже о качестве применяемого топлива и моторного масла. В таблице 8.2 приведены наиболее распространенные варианты состояния свечей после эксплуатации и даны рекомендации по оценке технического состояния ДВС по виду рабочей части свечи зажигания.

8.4. Очистка свечи от нагара

Примерно до середины XX века свечи очищали от нагара, нагревая их до температуры самоочищения. Для этого часто использовались кузнечные горны, куда свечи устанавливали на поддоне. Это было возможным потому, что в старых конструкциях свечей центральный электрод закрепляли в изоляторе тер-

моцементом. Современные свечи как отечественные, так и многие зарубежные, герметизированы по соединению центрального электрода с изолятором специальным стеклогерметиком, который повреждается при нагреве до температуры 350-400 С. Поэтому применение нагрева для очистки свечи зажигания от нагара следует ограничивать сушкой при температуре до 200 С. При известном навыке свечу можно очистить с помощью направленной газовой горелки, при этом воздействовать можно только на покрытую нагаром рабочую часть. На СТО свечи очищают на пескоструйном аппарате, а затем проверяют на искрообразование и герметичность. При необходимости очистку можно произвести с помощью растворителей и щеток, кроме металлических. Возможно применение других подручных средств. В безвыходной ситуации можно аккуратно отогнуть электрод массы и очистить вкруговую тепловой конус изолятора мелкой шкуркой.

8.5. Проверка работоспособности.

На СТО проверку работоспособности свечи осуществляют путем определения бесперебойности искрообразования и герметичности с помощью прибора, входящего в комплект изделий для очистки и проверки искровых свечей зажигания модели Э203 производства ОАО «ГАРО» или другого аналогичного прибора.

Установленная безотказная наработка свечей зажигания двигателей автомобилей при системе зажигания с энергией разряда до 20 мДж для первой категории условий эксплуатации по ГОСТ 15150 должна быть не менее 30 тыс. км пробега автомобиля. При системе зажигания с энергией разряда свыше 20 мДж для первой категории условий эксплуатации должна быть не менее 20 тыс. км пробега автомобиля. Установленная безотказная наработка свечей зажигания для двухтактных двигателей внутреннего сгорания устанавливается по согласованию с потребителями.

Критерием предельного состояния свечей зажигания следует считать не устраняемый очисткой от нагара перебой в искрообразовании при условии указанном в таблице 8.3.

Таблица 8.3

Искровой зазор, мм, не более	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Давление бесперебойности искрообразования, кгс/см ² , не менее	7,0	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5

Примечания. Проверку свечей зажигания следует проводить при величине искрового зазора, указанного в инструкции по эксплуатации. Испытательное напряжение при проверке свечей зажигания в эксплуатации должно быть не более 18 кВ, а время нарастания фронта импульса напряжения от 10 до 90 % максимального значения должно быть не более 80 мкс.

Литература

1. Абрамсон И.Д. Керамика для авиационных изделий.— М.: «Оборонгиз», 1963.
2. Арустамов Л.Х., Шендеровский И.М., Яхутль Д.Р. Математическое моделирование тепловой характеристики искровых свечей зажигания// Автомобильные и тракторные двигатели: Межвузовский сборник научных трудов.— М.: МГТУ «МАМИ», 1999.— Вып. XV.—С. 266-280.
3. Балагуров В.А. Аппараты зажигания.— М.: Машиностроение, 1968.
4. Балкевич В.Л. Техническая керамика: Учеб. пособие для втузов.— 2-е изд., перераб. И доп.— М.: Стройиздат, 1984.
5. Басс Б.А., Яхутль Д.Р. Теоретическое и экспериментальное исследование теплового поля в свечах зажигания// Труды НИИАвтоприборов.— М.: НИИАвтоприборов, 1977.
6. Басс Б.А., Дудиков Н.К. Свечи зажигания с повышенным сроком службы// «Автотракторное Электрооборудование», 1983, №3.
7. Басс Б.А. Повышение топливной экономичности бензиновых двигателей увеличением энергии источника искрового зажигания. — Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МАМИ, 1984.
8. Басс Б.А., Скобликов А.С. Малогабаритные свечи зажигания// «Автомобильная промышленность», 1984, №9.
9. Басс Б.А. Свечи зажигания: Краткий справочник.— М.: Изд-во «За рулем», 2002.
10. Брагинский С.И. К теории развития канала искры//ЖЭТФ. Т. 34. № 6. — 1958.— С. 1548–1557.
11. Будников Г.В., Шендеровский И.М., Шустов О.И., Яхутль Д.Р. Комплекс программ математического моделирования температурных полей свечи зажигания// Вопросы электронизации автомобилей: материалы Всесоюзного научно-технического семинара. — М.: НИИАЭ, 1990.— С. 102.

12. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя.— Свердловск: Машгиз, 1962.
13. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). — М.: Наука, 1973.
15. Крылов О. В. Метод конечных элементов и его применение в инженерных расчетах: Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 2002.
16. Литовский Е.Я., Пучкевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров: Справочное изд.— М.: Металлургия, 1982. — 152 с.
17. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей: Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1987. — 512 с.
18. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах.— М.: Мир, 1968.
19. Малу Р., Искровое зажигание: физика процесса и его влияние на работу двигателя внутреннего сгорания//сб. «Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями»: пер. с англ. под ред. А.В. Кострова. — М.: «Машиностроение», 1988. — С. 112–166.
20. ОСТ 37.003.081-98 Свечи зажигания искровые. Общие технические условия.
21. ОСТ 37.003.036-87 Изоляторы керамические для искровых свечей зажигания. Технические условия.
22. Полищук Ю.Ф., Заволокин А.Б., Басс Б.А. Производство свечей зажигания с применением автоматических роторных линий.— Ульяновск, 1997.
23. Полоцкий И.В., Стельмашук Е.В., Яхутль Д.Р. Специальные термопары для термометрирования в камере сгорания двигателей тарировочных установок — М.: Автотракторное электрооборудование, № 5, 1982, с. 25-28
24. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. — М.: «Энергия», 1971.

25. Румянцев В.Н., Скрябин Г.Н., Яхутль Д.Р. К вопросу повышения стабильности тепловых характеристик свечей зажигания А23 и А17ДВ – М: Автотракторное электрооборудование, № 9, 1979, с. 5-9.
26. Скобликов А.С. Минеев А.Н. Басс Б.А. Свечи зажигания для двигателей внутреннего сгорания с форсированным режимом работы. Москва, 1972.
27. Хазанов З.С., Федяев Ф.П., Курякова В.А. Свечи зажигания для двигателей внутреннего сгорания с форсированным режимом работы. Москва, 1977.
28. Яхутль Д.Р., Шендеровский И.М. Математическая модель теплового поля современных искровых свечей зажигания// Труды НИИАвтоприборов.—М.: НИИАП, 1985.— вып. 58.— С. 177-188.
29. Яхутль Д.Р., Румянцев В.Н., Стельмашук Е.В. Свечи со встроенной термопарой и их применение для подбора свечей зажигания к карбюраторным двигателям – М.: Автотракторное электрооборудование, № 58, 1985, С. 186-189.
30. Яхутль Д.Р., Арустамов Л.Х. Методика и аппаратура для определения калильных чисел свечей зажигания. Материалы научно – технической конференции, посвящённой 50-летию МАМИ – М.: МАМИ, 1989, с. 109.
31. Яхутль Д.Р., Будников Г.В., Шендеровский И.М. Математическое моделирование температурных полей и расчетное прогнозирование калильного числа свечей зажигания// Материалы научно-технической и научно-методической конференции, посвященной 50-летию МАМИ.— М: МАМИ, 1989.— С. 109.
32. Будников Г.В., Шендеровский И.М., Шустов О.И., Яхутль Д.Р. Комплекс программ математического моделирования температурных полей свечи зажигания// Вопросы электронизации автомобилей: материалы Всесоюзного научно-технического семинара. — М.: НИИАЭ, 1990.— С. 102.
33. Яхутль Д.Р., Шендеровский И.М. Методика расчета и экспериментальной оценки теплового состояния элементов ДВС// Вопросы электронизации автомобилей: материалы Всесоюзного отраслевого научно-технического семинара. — М.: НИИАЭ, 1991.— С. 100-101.

34. Яхутль Д.Р. Расчетный и экспериментальный методы определения температурного поля и калильных чисел свечей зажигания бензиновых двигателей. — Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МАМИ, 1991.
35. ISO 1919. Транспорт дорожный. Свечи зажигания M14x1,25 с плоской опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
36. ISO 2344. Транспорт дорожный. Свечи зажигания M14x1,25 с конической опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
37. ISO 2345. Транспорт дорожный. Свечи зажигания M18x1,5 с конической опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
38. ISO 2346. Транспорт дорожный. Свечи зажигания малогабаритные M14x1,25 с плоской опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
39. ISO 2347. Транспорт дорожный. Свечи зажигания малогабаритные M14x1,25 с конической опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
40. ISO 2346. Транспорт дорожный. Свечи зажигания M10x1,0 с плоской опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
41. ISO 2346. Транспорт дорожный. Свечи зажигания M12x1,25 с плоской опорной поверхностью и посадочное место в головке цилиндров.
42. ISO 3412. Транспорт дорожный. Экранированные и влагозащищенные свечи зажигания и их соединения. Типы 1а и 1в.
43. ISO 3895. Транспорт дорожный. Экранированная и влагозащищенная свеча зажигания и ее соединения. Тип 2.
44. ISO 3896. Транспорт дорожный. Экранированная и влагозащищенная свеча зажигания и ее соединения. Тип 3.
45. ISO 8470. Транспорт дорожный. Свечи зажигания M14x1,25 с плоской опорной поверхностью, размером шестигранника под ключ 16 мм и посадочное место в головке цилиндров.
46. ISO 11585. Свечи зажигания. Технические требования и методы испытаний.

Приложение 1.

Основные параметры свечей зажигания отечественного производства

Тип свечи зажигания	Наименование предприятий - изготовителей	Резьба на корпусе мм	Длина резьбы мм	Размер под ключ мм	Искровой зазор мм	Калильное число	Масса кг
A10H	ООО ГРАН-ЛТД	M14x1,25	12	20.8	0.85	11	0,053
A11	ОАО ЗАЭС ГУП ПО УМЗ ООО ГРАН-ЛТД	M14x1,25	12	20.8	0.85	11	0,053
A11-1	УЗЭТИ	M14x1,25	12	20,8	0,85	11	0,053
A11-3	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	12	20.8	0,85	11	0,053
A11-5	ООО ЭЛИС-ЭЗ	M14x1,25	12	20,8	0,6	11	0,053
A11P	ОАО ЗАЭС ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	12	20.8	0,85	11	0,053
A14B	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	12	20.8	0.5	14	0,053
	ООО ГРАН-ЛТД ООО ЭЛИС-ЭЗ						
A14B-2	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	12	20.8	0.8	14	0,053
A14BM	ОАО ЗАЭС ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	12	20.8	0.8	14	0,053
A14BP	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	12	20.8	0.8	14	0,053
A14Д	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	19	20.8	0.7	14	0,062
A14ДВ	ОАО ЗАЭС ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20.8	0.7	14	0,062
A14ДВР	ОАО ЗАЭС ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20.8	0.7	14	0,062
A14ДВРМ	ОАО ЗАЭС ОАО ЕАЕ	M14x1,25	19	20.8	0.7	14	0,062
AУ14ДВРМ	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	19	¹⁶	0.7	14	0,045
A17B	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ООО ГРАН-ЛТД ООО ЭЛИС-ЭЗ	M14x1,25	12	20.8	0,7	17	0,053
A17BM	ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	12	20,8	0,7	17	0,053
A17BPM	ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	12	20,8	0,7	17	0,053
A17Д	УЗЭТИ	M14x1,25	19	20,8	0,8	17	0,057
A17ДВ	ОАО ЗАЭС ГУП ПО УМЗ ООО ГРАН-ЛТД	M14x1,25	19	20.8	0.5	17	0,062
	ООО ЭЛИС-ЭЗ+В48	M14x1,25					
A17ДВ-1	УЗЭТИ	M14x1,25	19	20,8	0,5	17	0,062
A17ДВ-10	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ГУП ПО УМЗ ООО ГРАН-ЛТД ООО ЭЛИС-ЭЗ	M14x1,25	19	20.8	0.7	17	0,062
A17ДВW	ООО ГРАН-ЛТД	M14x1,25	19	20,8	2x0,5	17	0,056

Продолжение приложения 1.

Основные параметры свечей зажигания отечественного производства

Тип свечи зажигания	Наименование предприятий - изготовителей	Резьба на корпусе мм	Длина резьбы мм	Размер под ключ мм	Искровой зазор мм	Калильное число	Масса кг
A17ДВМ	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20.8	0.7	17	0,062
A17ДВР	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20.8	0.7	17	0,062
	ООО ГРАН-ЛТД						
A17ДВРМ	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20.8	0,7	17	0,062
AM17В	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	9,5	19	0.5	17	0,035
AУ17ДВРМ	ОАО ЗАЭС УЗЭТИ	M14x1,25	19	16	1.0	17	0,045
СИ12РТ	УЗЭТИ	M14x1,25	12	20,8	0,5	20	0,055
СИ12	ООО ГРАН-ЛТД	M14x1,25	12	20,8	0,5	20	0,055
A20Д	ОАО ЗАЭС ООО ГРАН-ЛТД ООО ЭЛИС-ЭЗ	M14x1,25	19	20.8	0.7	20	0,062
A20Д-1	УЗЭТИ	M14x1,25	19	20.8	0.7	20	0,062
A23	ООО ГРАН-ЛТД ООО ЭЛИС-ЭЗ	M14x1,25	12	20.8	0.7	23	0,054
A23-2	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	12	20.8	0.7	23	0,054
A23В	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	12	20.8	0.75	23	0,054
A23ДМ	УЗЭТИ	M14x1,25	19	20,8	0,7	23	0,056
A23ДРМ	УЗЭТИ	M14x1,25	19	20,8	0,7	23	0,056
A23ДВР	УЗЭТИ	M14x1,25	19	20,8	0,6	23	0,056
A23ДВМ	ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20,8	0,6	23	0,056
A23ДВРМ	ГУП ПО УМЗ	M14x1,25	19	20,8	0,6	23	0,056
A26ДВ-1	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	19	20.8	2x1,0	26	0,056
M8-1	ОАО ЗАЭС	M18x1,5	12	24	0,7	8	0,062
СН423	ОАО ЗАЭС	M22x1,5	8	27	-	-	0,078
СН424М*	ОАО ЗАЭС	M22x1,5	20,5	30	0.3	-	0,194
СН436М*	ОАО ЗАЭС	M22x1,5	16,5	30	0.3	-	0,19
СН302А*	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	11	22	0.6	12	0,068
СН302Б*	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	11	22	0.6	12	0,07
СН305А*	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	11	22	0.6	12	0,112
СН307В*	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	11	22	0.5	11	0,116
СН310*	ОАО ЗАЭС	M14x1,25	11	22	0.4	-	0,112

Примечание:

* Экранированные свечи зажигания.

Расшифровка сокращенных наименований производителей:

1. ОАО ЗАЭС – ОАО с иностранными инвестициями "Завод автотракторных запальных свечей".
2. УЗЭТИ – Уфимский завод электротехнических изделий ФГУП Уфимского агрегатного производственного объединения.
3. ГУП ПО УМЗ– ГУП ПО "Ульяновский машиностроительный завод".
4. ООО ГРАН-ЛТД – ООО Научно - производственная фирма "ГРАН -ЛТД".
5. ООО "ЭЛИС-ЭЗ".

Взаимозаменяемость искровых свечей зажигания

Россия, ОСТ 37.003.081	AC DELCO США	AUTOLITE США	BERU Германия	BOSCH Германия	CHAMPION США	EYQUEM Франция	MAGNETI MARELLI Италия	NGK Япония	NIPPON DENSO Япония	BRISK (PAL) Чехия
A10H	45F	416	14-10A	W10AC	L86C	200	CW3N	B4H	W14F-U	N19
A11, A11-3	45F	416	14-9A	W9AC	L86C	502	CW3N	B4H	W14F-U	N19
A11-1, A11-5	45F	416	14-9A	W9AC	L86C	502	CW3N	B4H	W14F-U	N19
A11P	R44F	415	14R-8A	WR8AC	RL86C	нет данных	CW3NR	BR5HS	W14FR-U	NR17
A14B, A14B-2	43FS	275	14-8B	W8BC	L92YC	550S	CW7N	BP5HS	W14FP	N17Y
A14BM	C425FS	275	14-8B	W8BC	L92YC	550S	F7NC	BP5HS	W14FP	N17YC
A14BP	CR425FS	275	14R8B	WR8BC	RL87Y	RC42S	CW7NR	BPR4HS	W14FPR	NR17YC
A14Д	C44XL	394	14-8C	W8CC	N5C	600L	CW6L	B5ES	W17ES	L17
A14ДВ	43XLS	55	14-8DU	W8DC	N11YC	600LS	CW6LP	BP5ES	W16EX	L17Y
A14ДВР	CR425XLS	65	14R-8DU	WR8DC	RN11YC	RC32LS	CW6LPR	BPR5ES	W16EXR-U	LR17YC
A14ДВРМ	CR425XLS	65	14R-8DU	WR8DC	RN11YC	RC32LS	F6LCR	BPR5ES	W16EXR-U	LR17YC
AУ14ДВРМ	FR3LS	AP3924	14FR-8DU	FR8DCU	RC10YC	RFC42LS	6LCR	BCPR5ES	Q16PR-U11	DR17YC
AM17B	CS42S	2974	14S-7F	WS7F	CJ7Y	700CTS	AW5C	BPM6A	W20MP-U	P17Y
A17B	42FS	274	14-7BU	W7BC	L87YC	600S	CW6NP	BP6HS	W16FP	N15Y
A17BM	42FS	274	14-7BU	W7BC	L87YC	C42S	F6NC	BP6HS	W16FP	N15Y
A17BPM	42FS	274	14R-7BU	WR7BC	RL87YC	RC42S	F6NCR	BPR6HS	W16FPR	NR15Y
A17Д	42XLS	64	14-7DU	W7DC	N9YC	750LS	CW7L	BP6ES	W20EP	L15Y
A17ДВ	42XLS	64	14-7DU	W7DC	N9YC	750LS	CW7LP	BP6ES	W20EP	L15Y
A17ДВ-1	42XLS	64	14-7DU	W7DC	N9YC	750LS	CW7LP	BP6ES	W20EP	L15Y
A17ДВ-10	42XLS	64	14-7DU	W7DC	N9YC	750LS	CW7LP	BP6ES	W20EP	L15Y
A17ДВ-W	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	N9DMC	нет данных	нет данных	BP6EK	W20ET	нет данных
A17ДВР	CR42XLS	64	14R-7DU	WR7DC	RN9YC	RC52LS	CW7LPR	BPR6ES	W20EPR	LR15YC

Продолжение приложения 2.

Взаимозаменяемость искровых свечей зажигания

Россия, ОСТ 37.003.081	AC DELCO США	AUTOLITE США	BERU Германия	BOSCH Германия	CHAMPION США	EYQUEM Франция	MAGNETI MARELLI Италия	NGK Япония	NIPPON DENSO Япония	BRISK (PAL) Чехия
A17ДВМ	CR42XLS	64	14-7DU	W7DC	N9YC	C52LS	F7LC	BP6ES	W20EP	L15YC
A17ДВРМ	CR42XLS	64	14R-7DU	WR7DC	RN9YC	RC52LS	F7LCR	BPR6ES	W20EPR	LR15YC
AУ17ДВРМ	FR2LS	AP3924	14FR-7DU	FR7DCU	RC9YC	RFC52LS	7LCR	BCPR6ES	Q20PR-U11	DR15YC
A20Д, A20Д-1	C41XL	393	14-6CU	W7CC	N3C	75LB	CW7L	B7ES	W20ES	L14
A23, A23-2	41F	413	14-5AU	W5AC	L82C	755	CW8N	B7H	W22FS	N14
A23B	41 FS	413	14-5BU	W5BC	L82C	755S	CW8NP	BP7HS	W20FPR-L	N12Y
A23ДРМ	C42N	62	14-5C	W5CC	N3C	C72LS	FLC9LR	B7ES	W22ES	L14C
A23ДМ	41XLS	52	14-5CU	W5CC	N6C	C72LS	FLC9L	BP7ES	W22EK-S11	L12YC
A23ДВМ	41XLS	52	14-5DU	W5DC	N6YC	C72LS	F9LC	BP7ES	W22EK-S11	L12YC
A23ДВР	41XLS	52	14R-5DU	WR5DC	RN6YC	RC72LS	F9LCR	BPR7ES	W22EKR-S11	LR12YC
A23ДВРМ	41XLS	52	14R-5DU	WR5DC	RN6YC	RC72LS	F9LCR	BPR7ES	W22EKR-S11	LR12YC
A26ДВ-1	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	N6DMC	нет данных	нет данных	BP7EKN	W24ET-S	нет данных
M8-1	C88	378	18-10A	V8A	K17, D16	K200M	CM3N	A-6	L14-U	M18

Приложение 3.

Протокол периодических испытаний свечей зажигания (образец)

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель организации

«___» _____ 20__ года.

ПРОТОКОЛ № _____ от «___» _____ г.
 периодических испытаний свечей зажигания типов А.....; А.....; А..... произве-
 денных предприятием _____ в __ квартале
 20__г.

1. ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Договор

№

(План-график)

 Этап № __. Проведение периодических испытаний свечей зажигания в __ квартале
 20__г.

2. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

Свечи зажигания А.....; А.....; А..... произведенные предприятием
 _____ в __ квартале 20__г., образцы в количестве по __ шт. каждого ти-
 па. Каждому образцу свечи зажигания каждого типа был присвоен условный порядковый
 номер от __ до __.

3. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Проверка соответствия свечей зажигания производства предпри-
 ятия _____ требованиям ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые.
 Общие технические условия».

4. ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ

Периодические испытания производились в объеме в соответствии с ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые. Общие технические условия» (пп. 4.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5; 5.6; 5.7; 5.8; 5.10; 5.11; 5.12).

- 4.1. Проверка габаритных и присоединительных размеров.
- 4.2. Проверка внешнего вида изолятора и металлических деталей.
- 4.3. Проверка покрытий металлических деталей.
- 4.4. Проверка бесперебойности искрообразования.
- 4.5. Проверка величины утечки газа.
- 4.6. Проверка механической прочности.
- 4.7. Проверка толщины уплотнительного кольца.
- 4.8. Проверка калильного числа.
- 4.9. Проверка нагревом.
- 4.10. Проверка надежности приварки электрода массы.

5. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ.

Климатические условия при проведении проверок и испытаний соответствовали указанным в ГОСТ Р 52230 - 2004 и ОСТ 37.003.081-98. Перед проверками и испытаниями свечи зажигания очищали и просушивали. Величину искрового зазора проверяли и при необходимости устанавливали в соответствии с требованиями технической документации (указаниям на упаковке) на данный тип свечи зажигания. Контактную гайку (при ее наличии) и уплотнительное кольцо демонтировали при проверках бесперебойности искрообразования, величины утечки газа и механической прочности (пп. 5.5; 5.6; 5.7 - здесь и далее указаны пункты ОСТ 37.003.081-98).

5.1. Проверку габаритных и присоединительных размеров (п. 4.1) проводили универсальными инструментами и приборами.

5.2. Проверку внешнего вида изолятора и металлических деталей (пп. 5.2; 5.4) проводили визуально без применения увеличительных приборов. Внешний вид изоляторов свечей зажигания должен соответствовать требованиям ОСТ 37.003.036.

Металлические детали свечей зажигания (кроме электродов) должны иметь окисное или металлическое покрытие по ГОСТ 9.301. На металлических деталях свечей зажигания не допускаются трещины и сорванные нитки резьбы. На термоосадочной канавке и в местах наложения контактов при электротермической сборке свечей зажигания стандартом допускается частичное нарушение покрытия.

5.3. Испытание антикоррозионных свойств металлодеталей, имеющих окисное или никелевое покрытие (п.5.3) проводили на промасленной (в случае окисного покрытия) свече зажигания в камере соляного тумана в течение 2ч. 30мин. Туман образовывали распылением раствора хлористого натрия в воде в количестве (20 ± 3) г/л при температуре (20 ± 5) °С. Изделия располагали в камере так, чтобы в процессе испытания брызги раствора, капли с потолка стен и систем подвесов, не попадали на изделие. Распыление производили в течение 15 мин через каждые 45 мин.

Свечи зажигания считаются выдержавшими испытания, если после испытания отсутствует разрушение защитного покрытия, оголяющего основной металл. Допускаются очаги коррозии основного металла на острых кромках, углублениях деталей, на резьбах и участках корпуса с нарушенным при термической осадке защитным слоем.

5.4. Проверку бесперебойности искрообразования (п. 5.5) проводили путем установки свечи зажигания в барокамеру, обеспечивающую получение необходимого избыточного давления газа $0,85\pm0,05$ МПа ($8,5\pm0,5$ кг/см²) для свечей зажигания с величиной искрового зазора 0,6мм и более и $1,0\pm0,05$ МПа ($10\pm0,5$ кг/см²) для свечей зажигания с искровым зазором менее 0,6мм., с конструкцией, позволяющей наблюдать или регистрировать искрообразование между электродами свечи зажигания в течение не менее 30 с. После подведения испытательного напряжения не менее 22 кВ (амплитудное значение) искрообразование в искровом зазоре свечи зажигания должно быть бесперебойным.

5.5. Проверку величины утечки газа через соединения деталей свечи зажигания (п. 5.6.) проводили путем установки свечи зажигания в барокамеру, обеспечивающую получение избыточного давления $2,0\pm0,05$ МПа и измерения утечки газа в течение не менее 30 с. При этом утечку газа через соединения свечи с барокамерой не учитывают. Утечка газа через соединения деталей свечи зажигания не должна превышать 5 см³/мин.

5.6. Проверку механической прочности (п.5.7.) проводили путем монтажа свечи зажигания в соответствующее резьбовое отверстие стальной закаленной пластины и приложения раздельно:

- крутящего момента 45 Нм, приложенного к шестиграннику корпуса под ключ;
- изгибающей силы 400 Н, приложенной под углом 90° к контактной головке;
- растягивающей силы 300 Н, приложенной к контактной головке вдоль ее оси.

Свечи зажигания считаются выдержавшими испытания, если после испытания корпус и изолятор не имеют механических повреждений, контактная головка не извлеклась из изолятора, свечи зажигания после проведения данного испытания соответствуют требованиям пп. 5.5; 5.6 ОСТ 37.003.081-98.

5.7. Проверку толщины не спадающего уплотнительного кольца (п.5.8.) проводили после однократной затяжки усилием 30 Нм свечи зажигания в соответствующее резьбовое отверстие стальной закаленной пластины и ее демонтажа после затяжки.

Толщина уплотнительного кольца после испытания должна быть от 1,4 до 2,0 мм.

5.8. Проверку калильного числа (п.5.10) проводили в соответствии с ОСТ 37.003.081-98.

Допустимое отклонение калильного числа, установленное для данного типа свечи зажигания, не должно превышать $\pm 10\%$ от номинальной величины для свечей зажигания с изоляторами из керамики группы I по ОСТ 37.003.036.

5.9. Испытание на теплостойкость (п.5.11) проводили нагреванием ввертной части свечи зажигания в течение (10 ± 1) мин при температуре (700 ± 15) °С в печи и естественном охлаждении свечи зажигания на воздухе при температуре (20 ± 5) °С. Испытуемые свечи зажигания устанавливают в отверстия пластины, имеющей толщину, равную длине ввертной части свечи зажигания. Пластину, состоящую из двух стальных листов и асбестовой прокладки между ними, помещают в верхней части печи. Отверстия в пластине выполнены на 0,5 мм больше максимального наружного диаметра резьбы корпуса свечи зажигания. Пластина до установки свечей зажигания прогревается вместе с печью. Температуру в печи измеряют при помощи термопары, расположенной в центре пластины и опущенной на (50 ± 1) мм ниже пластины.

Наличие трещин на изоляторе определяют визуально после нанесения на его поверхность 0,5% раствора эозина или фуксина в этиловом техническом спирте с последующим промыванием в проточной воде и просушиванием.

Свечи зажигания считаются выдержавшими испытания, если после испытания на термостойкость (проверки нагревом) изоляторы не имеют трещин и после испытания свечи зажигания соответствуют требованиям пп. 5.5; 5.6 ОСТ 37.003.081-98.

5.10. Проверку надежности приварки электрода массы (п. 5.12) проводили однократным отгибанием его на 90° и возвращением в исходное положение. Электрод массы должен быть надежно приварен к корпусу свечи зажигания. Отрыв электрода и наличие трещин в месте приварки не допускаются.

6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

6.1. Универсальное и специальное оборудование - стенды, приборы, инструменты для определения и измерения линейных и угловых размеров, механических и электрических величин. Оборудование аттестовано до «___»_____ 20__ г.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

7.1. Габаритные и присоединительные размеры искровых свечей зажигания соответствуют требованиям ОСТ 37.003.081-98.

7.2. Внешний вид изоляторов свечей зажигания соответствует требованиям ОСТ 37.003.036-87. Внешний вид металлических деталей соответствует требованиям ОСТ 37.003.081-98.

7.3. Антикоррозионные свойства металлических деталей свечей зажигания соответствуют требованиям ОСТ 37.003.081-98.

7.4. Искрообразование свечей зажигания типов _____ с величиной искрового зазора до 0,6 мм бесперебойное при давлении в камере установки $1,0 \pm 0,05$ МПа ($10,0 \pm 0,5$ кг/см²).

Для свечей зажигания типов _____ с величиной искрового зазора 0,6 мм и более искрообразование бесперебойное при давлении $0,85 \pm 0,05$ МПа ($8,5 \pm 0,5$ кг/см²).

7.5. Свечи зажигания герметичны по соединению изолятора с корпусом, а также по соединению изолятора с изолированным электродом и контактной головкой при разности давлений $2,0 \pm 0,05$ МПа ($20 \pm 0,5$ кг/см²).

7.6. После монтажа свечей зажигания в соответствующее резьбовое отверстие в стальной закаленной пластине с затяжкой крутящим моментом 45 Нм, затем приложения изгибающего усилия 400 Н под углом 90° к контактной головке не обнаружены повреждения корпусов и изоляторов. После приложения растягивающего усилия 300 Н вдоль оси контактных головок последние удержались в канале изолятора. Свечи зажигания после испытания соответствуют требованиям пп 5.5. и 5.6. ОСТ 37.003.081-98.

7.7. Толщина уплотнительного кольца после затяжки усилием 30 Нм соответствует требованиям ОСТ 37.003.081-98.

7.8. Калильные числа свечей зажигания составляют следующие величины, в условных единицах по ОСТ 37.003.081-98 (таблица).

Таблица

Тип свечи зажигания	Величина калильного числа свечи зажигания с порядковым номером для данного типа		
	1	2	3

7.9. Свечи зажигания выдержали однократный нагрев воздухом при температуре 700 ± 15 °С в течение 10 мин. Трещин на изоляторе не обнаружено. Свечи зажигания после испытания соответствуют требованиям пп. 5.5; 5.6 ОСТ 37.003.081-98.

7.10. Проверка надежности приварки электрода массы показала, что свечи зажигания выдерживают отгибание его на 90° и возвращение в исходное состояние. Отрыв электрода не произошел, трещины в месте приварки не обнаружены.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Свечи зажигания типов А.....; А.....; А....., произведенные предприятием _____ в ____ квартале 20__г., выдержали испытания в объеме периодических и соответствуют требованиям пп. 4.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5; 5.6; 5.7; 5.8; 5.10; 5.11; 5.12 ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые. Общие технические условия».

2. Результаты испытаний распространяются на все другие модификации и типы свечей зажигания по ОСТ 37.003.081-98 «Свечи зажигания искровые. Общие технические условия», произведенные предприятием _____ в ____ квартале 20__г.

Испытания провели _____

Учебное издание

Яхутль Дауд Рамазанович, к.т.н.
Басс Борис Абрамович, к.т.н.
Малеев Руслан Алексеевич, к.т.н., доц.
Шендеровский Иосиф Макарович

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**«Искровые свечи зажигания. Основы проектирования и производства»
по дисциплине «Теория, конструкция и расчет автотракторного электро-
оборудования»**

Под редакцией авторов
Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательским отделом
МГТУ «МАМИ»

Подписано в печать 28.05.2010. Формата 60х90 1/16. Бумага 80 г/м²
Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. п. л. 11.1
Тираж 150 экз. Заказ № 159-10.

МГТУ «МАМИ»
Москва, 107023, Б.Семёновская ул., 38